



(10) DE 10 2019 002 329 A1 2020.10.01

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: 10 2019 002 329.3

(22) Anmeldetag: 01.04.2019

(43) Offenlegungstag: 01.10.2020

(51) Int Cl.: **H01L 21/66** (2006.01)

H01L 21/268 (2006.01)

(71) Anmelder:
Universität Bremen, 28359 Bremen, DE

(74) Vertreter:
**Meissner Bolte Patentanwälte Rechtsanwälte
Partnerschaft mbB, 28209 Bremen, DE**

(72) Erfinder:
**Tessarek, Christian, Dr., 28357 Bremen, DE;
Eickhoff, Martin, Prof., 28865 Lilienthal, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**HU [et al.]: Laser Thinning and Patterning of
MoS₂ with Layer-by-Layer Precision. Sci Rep 7,
15538 (2017) [online], DOI: 10.1038/s41598-017-
15350-4**

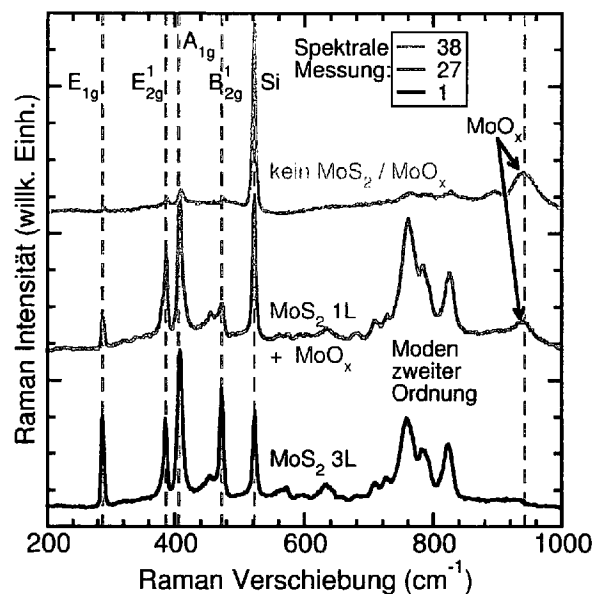
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Recherchantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur kontrollierten Abdünnung eines mehrlagigen van-der-Waals Schichtsystems**

(57) Zusammenfassung: Einige Materialien weisen als Monolage überraschende physikalische Eigenschaften auf. Das bekannteste Beispiel für ein derartiges Material ist Graphen. Bisher erfolgt die Herstellung von atomaren Monolagen unkontrolliert, was zu einer mäßigen Qualität der Monolagenstruktur führt und für eine technische Anwendung ungünstig ist. Die vorliegende Erfindung schafft ein Verfahren zur kontrollierten Herstellung einer atomaren Monolage, wobei die Monolage eine große Homogenität bzw. Qualität aufweist. Das wird dadurch erreicht, dass während einer Abdünnung des Materials mindestens ein Photonen-Energiespektrum aufgenommen wird und in Abhängigkeit von den ermittelten Photonenenergien Abdünnungsparameter einem Fortschritt der Herstellung der Monolage entsprechend dynamisch angepasst werden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer atomaren Monolage gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

[0002] Es ist bekannt, dass einige Materialien, deren Kristallstrukturen aus Schichtsystemen bestehen, ihre physikalischen Eigenschaften ändern, wenn sie lediglich als einzige Monolage vorliegen. Das bekannteste Beispiel für ein derartiges Material ist Graphen. Aber auch Halbleitermaterialien wie beispielsweise Molybdändisulfid (MoS_2) oder weitere Übergangsmetall-Dichalkogeniden wie WS_2 , WSe_2 , MoSe_2 , etc. weisen ein derartiges Verhalten auf.

[0003] Während Bilagen sowie alle weiteren mehrlagigen Schichtsysteme dieser Materialien, insbesondere MoS_2 , eine indirekte Bandlücke aufweisen, besitzt eine Monolage eine direkte Bandlücke. Diese direkte Bandlücke der Monolagen ermöglicht die Realisierung von völlig neuen elektronischen bzw. optoelektronischen Bauteilen. Aufgrund des damit verbundenen großen Potentials für Anwendungen, wird es angestrebt, Monolagen dieser Materialien mit einer hohen Verlässlichkeit und einer hohen Qualität herzustellen.

[0004] Bisher erfolgt die Herstellung von atomaren Monolagen unkontrolliert. Es sind unterschiedliche Verfahren zur Herstellung von einlagigen MoS_2 -Schichten bekannt. Dazu zählen zum Beispiel die mechanische und chemische Exfolierung, die Gasphasenabscheidung sowie die Molekularstrahlepitaxie. Bei jeder dieser Methoden verbleiben neben der Monolage überwiegend Bi- oder Mehrlagen, was die Qualität der Monolagenstruktur mindert. Ein weiteres Verfahren zur Erzeugung einer Monolage stellt die Abdünnung durch Laserbestrahlung dar. Hierbei werden mit einem Laserstrahl hoher Intensität mehrlagige Schichten bestrahlt und abgerastert. Durch diese Laserbestrahlung wird die Anzahl der mehrlagigen Schichten schrittweise reduziert, bis eine einzige Monolage auf dem Substrat zurückbleibt. Dieses Verfahren eignet sich somit prinzipiell gut für die Prozessierung von mehrlagigen Halbleiterschichten zur Erzeugung von großflächigen Monolagen. Auf diese Weise ist es möglich, Monolagen mit einer Breite bzw. Länge von einigen 10 μm herzustellen.

[0005] Bei den bekannten Verfahren wird die lagenweise Abdünnung des Halbleitermaterials durch die Messung einer Raman-Mode A_{1g} und über einen optischen Kontrast überwacht. Das heißt während der Laserstrahl bei konstanter Leistung sowie konstanter Schrittweite über die Mehrfachlagen verfahren wird, wird gleichzeitig an den von der Oberfläche der Mehrfachlagen emittierten Photonen Raman-Spektroskopie durchgeführt. Eine Anpassung der Abdünnungsparameter, wie beispielsweise der Laserleistung oder

der Schrittweite der Laserstrahlung auf der Oberfläche bzw. der Abstand der Rasterpunkte in Abhängigkeit von der erzielten Abdünnung, wurde bisher nicht vorgenommen. Anschließende Kontrolluntersuchungen der prozessierten Oberflächen bzw. der Monolagen ergeben eine starke Variation der optischen Aktivität der Schichten. Das bedeutet, dass entweder wegen zu geringer Bestrahlung eine Bi- oder Multilage vorhanden ist, oder die Monolage durch zu intensive Bestrahlung geschädigt wurde. Es sind weitere Verfahren bekannt, bei denen der Abstand zwischen den Raman-Moden E_{2g}^1 und A_{1g} während der Laser-Abdünnung ausgewertet werden. Über den Abstand dieser Raman-Moden ist es möglich, eine Angabe über die Anzahl der Lagen auf dem Substrat zu bestimmen. Monolagen weisen für Molybdändisulfid beispielsweise eine Modendifferenz von etwa 19 cm^{-1} auf, während Bilagen eine Differenz von 21 cm^{-1} bis 22 cm^{-1} aufweisen. Ein Problem, das sich dabei ergibt, besteht darin, dass die Abstände der Raman-Moden zwischen nicht prozessierten Monolagen und Monolagen nach der Laser-Abdünnung unterschiedlich sind. Der Abstand der Raman-Moden einer Laserabgedünnten Monolage liegt bei etwa 20 cm^{-1} . Damit liegt der Abstand zwischen nicht prozessierten Mono- und Bilagen. Mit den bekannten Verfahren ist eine verlässliche Herstellung einer großflächigen Monolage somit nicht möglich. Es lassen sich keine Monolagen mit einer hohen Qualität herstellen, was jedoch für eine Anwendung notwendig ist.

[0006] Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur kontrollierten Herstellung einer atomaren Monolage zu schaffen, durch welches eine Monolage mit einer großen Homogenität hergestellt werden kann.

[0007] Ein Verfahren zur Lösung dieser Aufgabe weist die Maßnahmen des Anspruchs 1 auf. Demnach ist es vorgesehen, dass während der Abdünnung des Materials mindestens ein Energiespektrum von Photonen, die nach Bestrahlung der Mehrfachlagen von selbigen wieder emittiert werden, aufgenommen wird. In Abhängigkeit von den ermittelten Photonenenergien werden sodann die Abdünnungsparameter einem Fortschritt der Herstellung der Monolage entsprechend dynamisch angepasst. Durch diese Anpassung der Laserabdünnungsparameter an den Fortschritt der Herstellung lässt sich eine besonders homogene Monolage auf dem Substrat erzeugen. Anhand des Energiespektrums der emittierten Photonen lassen sich Aussagen darüber treffen, wie viele atomare Lagen auf dem Substrat noch vorliegen. Sobald nur noch eine Monolage auf dem Substrat vorliegt, ist dies durch die Photonenergiespektren erkennbar. Die Oberfläche bzw. ein Bereich oder ein Rasterpunkt der Mehrfachlagen wird somit genau solange abgedünnt bzw. prozessiert bis anhand der Photonenenergiespektren eine Monolage festgestellt wird. Bei Annähern an eine Monolage werden da-

bei die Prozessparameter dynamisch so angepasst, dass die Wahrscheinlichkeit für die Zerstörung der verbleibenden Monolage auf ein Minimum reduziert wird.

[0008] Insbesondere kann es erfindungsgemäß vorgesehen sein, dass für die Abdünnung Photonen, vorzugsweise ein Laser, bzw. eine Laserdiode, oder elektrisch geladene Teilchen, insbesondere Elektronen oder Ionen verwendet werden, wobei in Abhängigkeit von den ermittelten Photonenenergien als Abdünnungsparameter eine Energie und/oder eine Intensität und/oder eine Pulsrate und/oder eine Pulsdauer und/oder eine Schrittweite der Abdünnung bzw. der Abstand der Rasterpunkte auf der Lage eines Photonenstrahls oder eines Strahls elektrisch geladener Teilchen verändert wird. Durch den Energieübertrag der Photonen bzw. der Elektronen oder der Ionen auf die einzelnen Lagen werden diese schichtweise abgetragen. Aufgrund der kovalenten Bindungen zwischen den Atomen einer Schicht muss diese mindestens mit einer Energie mit einer Intensität beaufschlagt werden, die ausreicht, die Bindung zu dissoziieren. So ist es beispielsweise vorgesehen, dass ein Laser mit der Wellenlänge von 325 nm verwendet wird. Gleichmaßen kann die Wellenlänge aber auch kleiner oder größer sein, beispielsweise 244 nm, 406 nm oder 650 nm. Allerdings ist es vorgesehen, Wellenlängen zu verwenden, die auch für die Erstellung der Photonenenergiespektren geeignet sind. In Abhängigkeit der ermittelten Photonenenergien sind die genannten Abdünnungsparameter einzeln oder kombiniert zu verändern. In welchem Maße die Abdünnungsparameter anzupassen sind, kann durch eine Steuereinheit bzw. eine Software ermittelt werden. Die Steuerungsdaten für die Anpassung werden sodann an die entsprechende Apparatur zur Herstellung der Monolage weitergegeben. Der Vorteil der Verwendung von geladenen Teilchen besteht darin, dass auch nanostrukturierte Strukturen auf dem Substrat oder auf den Mehrfachlagen herstellbar sind; während durch die Verwendung von Lasern die Größe der herzustellenden Strukturen auf einige 100 nm beschränkt ist. Die genannten Abdünnungsparameter werden derart und solange angepasst, bis der gesamte Zielbereich auf dem Substrat nur noch eine atomare Monolage aufweist.

[0009] Bevorzugt kann es außerdem vorgesehen sein, dass zur Abdünnung ein Bereich der Mehrfachlagen mehrmals in einem Raster schrittweise von dem Photonen- bzw. Teilchenstrahl abgefahren wird und währenddessen Photonenenergiespektren aufgenommen werden. Während die Spotgrößen der Laserstrahlen einige 100 nm groß sind, ist die Spotgröße eines Teilchenstrahls wesentlich kleiner. Dementsprechend müssen die verschiedenen Strahlen öfters über die Mehrfachlagen bzw. das Substrat bewegt werden, um die gesamte Fläche abzdünnen. Alternativ kann es jedoch auch vorgesehen sein, dass der

Laserspot oder der Fokus des Teilchenstrahls so lange an einem Punkt verbleibt, bis die Photolumineszenz- und/oder Raman-Signale vordefinierte Intensitäten erreicht haben. Erst dann wird der nächste Rasterpunkt angefahren.

[0010] Weiter kann es erfindungsgemäß vorgesehen sein, dass während der Herstellung der Monolage über mehrere Messungen bzw. Abdünnungsschritte aus den Photonenenergiespektren eine zeitliche Entwicklung und/oder ein Abstand von mehreren Raman-Moden, vorzugsweise der E_{1g} - und/oder der E'_{2g} - und/oder der A_{1g} - und/oder der B'_{2g} - und/oder der MoO_x -Mode und/oder der Si-Mode und/oder Moden zweiter Ordnung, von der prozessierten Lage aufgenommen und anhand der Intensitäten der Raman-Moden und/oder der Abstände der Moden die Anzahl der Lagen auf dem Substrat ermittelt wird. Insbesondere die Ermittlung mehrerer Abstände und/oder Intensitäten wenigstens einiger der genannten Moden kann zu einem sehr zuverlässigen Ergebnis bezüglich der Anzahl der Lagen auf dem Substrat führen. So nimmt die Intensität einiger Moden mit Abnahme der Anzahl der Lagen zu, während die Intensitäten anderer Moden abnehmen. Gleichmaßen verschieben sich einige Moden relativ zueinander mit abnehmender Anzahl der Lagen. Durch die Beobachtung der zeitlichen Entwicklung wenigstens einiger der genannten Moden während der Abdünnung ist es möglich, eine Monolage sehr zuverlässig zu erkennen. Insbesondere die Raman-Mode des Substrats weist eine eigene Charakteristik auf, sodass sofort erkennbar ist, wenn auch die Monolage abgedünnt ist. Nach der Beaufschlagung der Mehrfachlagen mit einem Photonenstrahl bzw. Elektronen- oder Ionenstrahl zum Abdünnen wird mindestens ein Photonenenergiespektrum aufgenommen, um die zeitliche Entwicklung der Raman-Moden zu ermitteln. Für eine ausreichende Statistik können pro Abdünnungsschritt mehrere Photonenenergiespektren aufgenommen und ausgewertet werden.

[0011] Weiter kann es vorgesehen sein, dass während der Herstellung der Monolage über mehrere Messungen bzw. Abdünnungsschritte aus den Photonenenergiespektren eine zeitliche Entwicklung eines Photolumineszenzspektrums, insbesondere zwischen 1,0 eV und 3,0 eV, vorzugsweise zwischen 1,5 eV und 2,5 eV, von der prozessierten Lage aufgenommen und anhand der gemessenen energieselektiven Photonenintensitäten die Anzahl der Lagen auf dem Substrat ermittelt wird. Dadurch, dass die Monolage eine direkte Bandlücke ausbildet, ist das Erreichen einer Monolage sehr gut anhand des Photolumineszenzspektrums erkennbar. Solange sich auf dem Substrat noch eine Mehrfachlage befindet, weisen die einzelnen Schichten eine indirekte Bandlücke auf; was zu einem signifikant anderen Photolumineszenzspektrum führt als für eine Monolage. Bei der Photolumineszenzspektroskopie werden Photo-

nenenergien in einem ausreichend großen Spektralbereich von beispielsweise 500 nm bis 1000 nm erfasst und ausgewertet.

[0012] Ein weiteres vorteilhaftes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung kann es vorsehen, dass für die Bestimmung der Anzahl der Lagen sowohl Raman-Spektren als auch Photolumineszenzspektren während der Herstellung der Monolage aufgenommen werden. Durch die Aufnahme von zwei verschiedenartigen Spektren, durch welche unterschiedliche physikalische Effekte erfasst werden, kann die Präzision der Lagenanzahlbestimmungen während des Abdünnungsprozesses verbessert werden. Für MoS₂ lässt sich insbesondere mit einer hohen zeitlichen Auflösung und mit einem Laser der Wellenlänge von 325 nm ein sehr verlässliches Ergebnis bezüglich der Anzahl der Monolagen erzielen. Für andere Materialien eignen sich andere Wellenlängen bzw. Energie besser. Die bevorzugten Laserenergien für Raman-Spektroskopie an verschiedenen Materialien sind aus der Literatur hinlänglich bekannt. Die Verwendung von Wellenlängen im visuellen Spektralbereich ist zu bevorzugen, da hier der Messaufbau wesentlich einfach zu handhaben und günstiger ist.

[0013] Bevorzugt kann es außerdem vorgesehen sein, dass die Raman-Spektren und/oder die Photolumineszenzspektren, insbesondere unter Verwendung eines Beam-Splitters, während bzw. bei gleichzeitiger Abdünnung mittels Laser aufgenommen werden, wobei die für die Raman- und/oder Photolumineszenz-Spektren detektierten Photonen aus einer Wechselwirkung des Abdünnungs-Lasers mit den Lagen resultieren. Die detektierten Photonen, aus denen die Raman-Spektren und/oder die Photolumineszenz-Spektren erzeugt werden, resultieren somit direkt aus dem Abdünnungsprozess. Dadurch ist lediglich eine Strahlungsquelle für die Herstellung der Monolage und die gleichzeitige Kontrolle des Herstellungsprozesses notwendig. Dadurch, dass die Raman-Spektren und die Photolumineszenz-Spektren in unterschiedlichen Wellenlängen- bzw. Spektralbereichen liegen, müssen zwei verschiedene Photondetektoren für die energiewahlweise Messung verwendet werden.

[0014] Außerdem kann es erfindungsgemäß vorgesehen sein, dass die Abdünnung mittels Photonen oder elektrisch geladenen Teilchen pulsartig bzw. getaktet erfolgt und zwischen den Pulsen der Photonen oder der elektrisch geladenen Teilchen die prozessierte Lage mit einem Photonenstrahl eines bevorzugten Spektralbereichs für die Raman- und/oder Photolumineszenz-Spektroskopie beaufschlagt wird. Somit ist es denkbar, dass mindestens zwei verschiedene Strahlen verschiedener Wellenlängen für die kontrollierte Herstellung der Monolage verwendet werden. Zunächst wird beispielsweise für die Ab-

dünnung ein besonders geeigneter Laser oder ein Teilchenstrahl verwendet. Die prozessierte Lage wird dann gleichzeitig oder im Wechsel mit einem weiteren Photonenstrahl beaufschlagt, mit dem sich die Raman- bzw. Photolumineszenz-Spektroskopie bevorzugt durchführen lässt. Durch diese Kombination von Strahlen verschiedener Art bzw. Energie lässt sich sowohl nahezu jede beliebige Struktur prozessieren bzw. ätzen als auch über ein geeignetes Spektroskopieverfahren der Herstellungsprozess kontrollieren.

[0015] Es kann außerdem vorgesehen sein, dass die Monolage aus Übergangsmetall-Dichalkogeniden, vorzugsweise MoS₂, WS₂, WSe₂, aus Heterostrukturen unterschiedlicher 2D-Materialien, 2D-Isolatoren, insbesondere BN, oder 2D-Halbleitern wie Graphen hergestellt werden. Darüber hinaus ist es denkbar, dass noch weitere Materialien durch das hier beschriebene Verfahren kontrolliert hergestellt werden.

[0016] Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung kann darin bestehen, dass die Raman- und/oder Photolumineszenz-Spektren während der Abdünnung automatisch analysiert werden und in Abhängigkeit vom Ergebnis der Auswertung die Abdünnungsparameter automatisch angepasst werden, um eine vorbestimmte Struktur mit einer atomaren Monolage herzustellen.

[0017] Im Folgenden werden einige Spektren dargestellt, an denen sich die Ausbildung einer Monolage während der Abdünnung besonders gut erkennen lässt:

Fig. 1 Darstellung der zeitlichen Entwicklung von Raman-Moden während eines Abdünnungsprozesses,

Fig. 2 Darstellung integrierter Intensitäten der Raman-Moden aus **Fig. 1**, und

Fig. 3 eine Darstellung eines Photolumineszenz-Spektrums während eines Laserabdünnungsprozesses.

[0018] Für die Herstellung einer atomaren Monolage wird erfindungsgemäß während eines Abdünnungsprozesses ein Raman-Spektrum und/oder ein Photolumineszenz-Spektrum von Photonen, welche von der Oberfläche der Mehrfachlagen bzw. Monolage emittiert werden, aufgenommen. Bei diesem Verfahren ist es denkbar, dass die Abdünnung mittels Photonen, also unter Verwendung eines Lasers, oder durch Beaufschlagung der Oberfläche mit geladenen Teilchen, insbesondere Elektronen oder Ionen, erfolgt. Bei der Verwendung eines Lasers können die von der Mehrfachlage bzw. Monolage emittierten Photonen dieses Lasers verwendet werden, um ein Raman-Spektrum bzw. ein Photolumineszenz-Spektrum zu erstellen. Alternativ ist es außerdem denkbar, dass zusätzlich zu dem Laser bzw. dem Teilchen-

strom die prozessierte Oberfläche im Wechsel oder gleichzeitig zu den vorgenannten Strahlen mit Licht beaufschlagt werden. Bei dem für die Spektroskopie verwendeten Spektralbereich kann es sich um ultraviolettes, visuelles oder Infrarotlicht handeln.

[0019] Das erfindungsgemäße Verfahren sieht es vor, anhand der zeitlichen Entwicklung von Resonanzen bzw. Kennlinien bzw. physikalischen Eigenschaften des Materials, die Parameter für die Abdünnung der Mehrfachschichten derart zu regeln bzw. einzustellen, dass für die gewünschte Struktur eine Monolage mit einer hohen Qualität, d. h. ohne eine Mehrfachlage oder ohne Lage, hergestellt wird. In der **Fig. 1** sind für verschiedene Abdünnungsschritte, nämlich für den 1., für den 27. sowie für den 38. Abdünnungsschritt, die entsprechenden Raman-Intensitäten gegenüber einer Raman-Verschiebung aufgetragen. Die erste Messung, d. h. der erste Abdünnungsschritt der Mehrfachlagen, weist im Bereich von 200 cm^{-1} bis 600 cm^{-1} fünf ausgeprägte Peaks auf. Bei diesen Peaks handelt es sich um die vier Raman-Moden E_{1g} , E_{2g}^1 , A_{1g} und B_{12g} des MoS_2 sowie um eine Raman-Mode des Siliziumsubstrates. In dem Bereich um 800 cm^{-1} sind weitere Moden zweiter Ordnung zu erkennen. Mit voranschreitender Verdünnung der Mehrfachschichten, d. h. mit weiteren Messungen, verändern sich die Intensitäten der einzelnen Moden sowie deren Abstände. Bei der 38. Messung, d. h. bei einem letzten Abdünnungsschritt sind die Raman-Moden des Halbleiters nahezu komplett verschwunden und der Substratpeak hat sich sehr dominant herausgebildet. Dies ist ein Zeichen dafür, dass die MoS_2 -Schichten komplett von dem Siliziumsubstrat abgedünnt wurden.

[0020] In der **Fig. 2** sind für jede der in **Fig. 1** erkennbare Raman-Mode die integrierten Intensitäten für jeden Abdünnungsschritt dargestellt. Aus dem Verlauf der integrierten Intensitäten der einzelnen Raman-Moden lassen sich die Übergänge von einer Dreifachlage zu einer Bilage sowie von der Bilage zur Monolage erkennen. Während die Intensitäten einiger Moden bei der 28. Messung deutlich abnehmen, nimmt die Intensität der Silizium-Mode zu. Wenn während des Abdünnungsprozesses diese Änderung der Intensitäten festgestellt wird, wird der Abdünnungsprozess für diesen Bereich auf dem Substrat beendet. Sofern weitere Bereiche auf dem Substrat existieren, bei denen dieser Übergang zu der Monolage noch nicht ermittelt werden konnte, ist der Abdünnungsprozess in diesen Bereichen fortzuführen.

[0021] Alternativ oder zusätzlich zu den Raman-Spektren ist erfindungsgemäß vorgesehen, von den prozessierten Lagen zusätzlich ein Photolumineszenz-Spektrum aufzunehmen. In der **Fig. 3** ist für jede der Messungen bzw. für jeden Abdünnungsschritt ein Photolumineszenz-Spektrum in dem Bereich von $1,2\text{ eV}$ bis $2,4\text{ eV}$ dargestellt. Die Intensitäten der ein-

zelnen gemessenen Photonenenergien für jede Messung bzw. für jeden Abdünnungsschritt sind logarithmisch in dem Graph aufgeführt. Besonders auffällig ist der Bereich um $1,8\text{ eV}$ bis $1,9\text{ eV}$ um die 28. Messung. Die hier beschriebenen Halbleiter weisen als Mehrfachschichtsystem eine indirekte Bandlücke auf. Die Monolage hingegen weist eine direkte Bandlücke auf. Sobald die Abdünnung der Mehrfachschichten zu einer Monolage geführt hat, nimmt die Photolumineszenz aufgrund der sich ausbildenden direkten Bandlücke um $1,8\text{ eV}$ sprunghaft zu, wobei gleichzeitig die Intensität für den indirekten Übergang bei niedrigeren Photonenenergien (ca. $1,4\text{ eV}$) verschwindet. Genau dies ist in **Fig. 3** zu beobachten. Somit erweist sich auch die Aufnahme eines Photolumineszenzspektrums als sehr guter Indikator für das Erreichen einer Monolage auf dem Substrat. Da nicht alle der hier genannten Halbleitermaterialien der Raman-Spektroskopie bzw. der Photolumineszenz-Spektroskopie zugänglich sind, erweist sich die Kombination beider Verfahren bzw. die Möglichkeit mindestens eines der Verfahren nutzen zu können, als besonders vorteilhaft. Durch dieses Feedback des Herstellungsprozesses durch die Aufnahme der Photonenenergien lässt sich besonders genau und mit einer hohen Verlässlichkeit eine Struktur bestehend aus einer Monolage eines bestimmten Halbleitermaterials herstellen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur kontrollierten Herstellung einer atomaren Monolage mittels Abdünnung von atomaren Mehrfachlagen, die auf einem Substrat angeordnet sind, wobei zur Bestimmung einer Anzahl der atomaren Lagen während der Herstellung mindestens ein Energiespektrum von Photonen, die nach Bestrahlung von Mehrfachlagen von selbigen wieder emittiert werden, aufgenommen wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass in Abhängigkeit von den ermittelten Photonenenergien Abdünnungsparameter einem Fortschritt der Herstellung der Monolage entsprechend dynamisch angepasst werden.

2. Verfahren zur kontrollierten Herstellung einer atomaren Monolage nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass für die Abdünnung Photonen, vorzugsweise ein Laser, bzw. eine Laserdiode, oder elektrisch geladene Teilchen, insbesondere Elektronen oder Ionen, verwendet werden, wobei in Abhängigkeit von den ermittelten Photonenenergien als Abdünnungsparameter eine Energie und/oder eine Intensität und/oder eine Pulsrate und/oder eine Pulsdauer und/oder eine Schrittweite der Abdünnung auf der Lage eines Photonenstrahls oder eines Strahls elektrisch geladener Teilchen verändert wird.

3. Verfahren zur kontrollierten Herstellung einer atomaren Monolage nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Abdünnung ein Be-

reich, insbesondere Rasterpunkte oder -flächen, der Mehrfachlagen mehrmals in einem Raster schrittweise von dem Photonen- bzw. Teilchenstrahl abgefahren werden und währenddessen oder nachfolgend Photonenenergiespektren aufgenommen werden.

4. Verfahren zur kontrollierten Herstellung einer atomaren Monolage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass während der Herstellung über mehrere Messungen bzw. Abdünnungsschritte aus den Photonenenergiespektren eine zeitliche Entwicklung und/oder ein Abstand von mehreren Raman-Moden, vorzugsweise der E_{1g} - und/oder der E_{2g}^1 - und/oder der A_{1g} - und/oder der B_{2g}^1 - und/oder der MoO_x -Mode und/oder einer Si-Mode und/oder Moden zweiter Ordnung, von der prozessierten Lage aufgenommen und anhand der Intensitäten der Raman-Moden und/oder der Abstände der Moden die Anzahl der Lagen auf dem Substrat ermittelt wird.

5. Verfahren zur kontrollierten Herstellung einer atomaren Monolage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass während der Herstellung über mehrere Messungen bzw. Abdünnungsschritte aus den Photonenenergiespektren eine zeitliche Entwicklung eines Photolumineszenzspektrums, insbesondere zwischen 1,0 eV und 3,0 eV, vorzugsweise zwischen 1,5 eV und 2,5 eV, von der prozessierten Lage aufgenommen und anhand der gemessenen energieselektiven Photonenintensitäten die Anzahl der Lagen auf dem Substrat ermittelt wird.

6. Verfahren zur kontrollierten Herstellung einer atomaren Monolage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass für die Bestimmung der Anzahl der Lagen sowohl Raman-spektren als auch Photolumineszenzspektren aufgenommen und ausgewertet werden.

7. Verfahren zur kontrollierten Herstellung einer atomaren Monolage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ramanspektren und/oder der Photolumineszenzspektren, insbesondere mittels eines Beam-Splitters, während der Abdünnung mittels Laser aufgenommen werden, wobei die für die Raman- und/oder Photolumineszenzspektren detektierten Photonen aus einer Wechselwirkung des Lasers für die Abdünnung mit den Lagen resultieren.

8. Verfahren zur kontrollierten Herstellung einer atomaren Monolage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass für die Aufnahme der Ramanspektren und/oder der Photolumineszenzspektren zwei unterschiedliche Messapparaturen, vorzugsweise Spektrometer, verwendet werden.

9. Verfahren zur kontrollierten Herstellung einer atomaren Monolage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Abdünnung mittels Photonen oder elektrisch geladenen Teilchen pulsartig bzw. getaktet erfolgt und zwischen den Pulsen der Photonen oder der elektrisch geladenen Teilchen die prozessierte Lage mit einem Photonenstrahl eines bevorzugten Spektralbereichs für die Raman- und/oder Photolumineszenzspektroskopie beaufschlagt werden.

10. Verfahren zur kontrollierten Herstellung einer atomaren Monolage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Monolage aus Übergangsmetall-Dichalkogeniden, vorzugsweise MoS_2 , WS_2 , WSe_2 , aus Heterostrukturen unterschiedlicher 2D-Materialien, 2D-Isolatoren, insbesondere BN, oder 2D-Halbmalle wie Graphen hergestellt werden.

11. Verfahren zur kontrollierten Herstellung einer atomaren Monolage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Raman- und/oder Photolumineszenzspektren während der Abdünnung automatisch analysiert werden und in Abhängigkeit von dem Ergebnis der Auswertung die Abdünnungsparameter automatisch angepasst werden, um eine vorbestimmte Struktur mit einer atomaren Monolage herzustellen.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

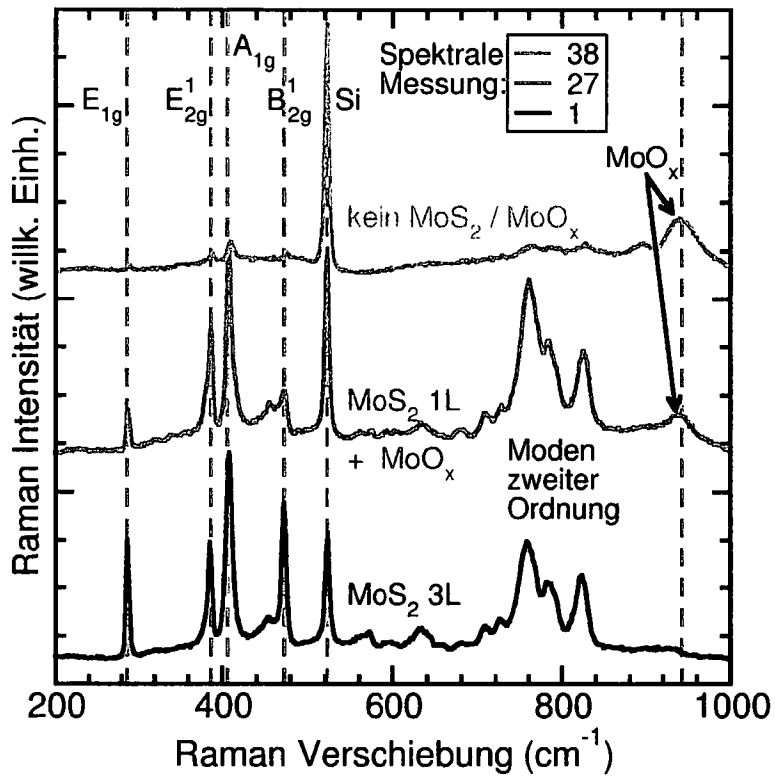


Fig. 1

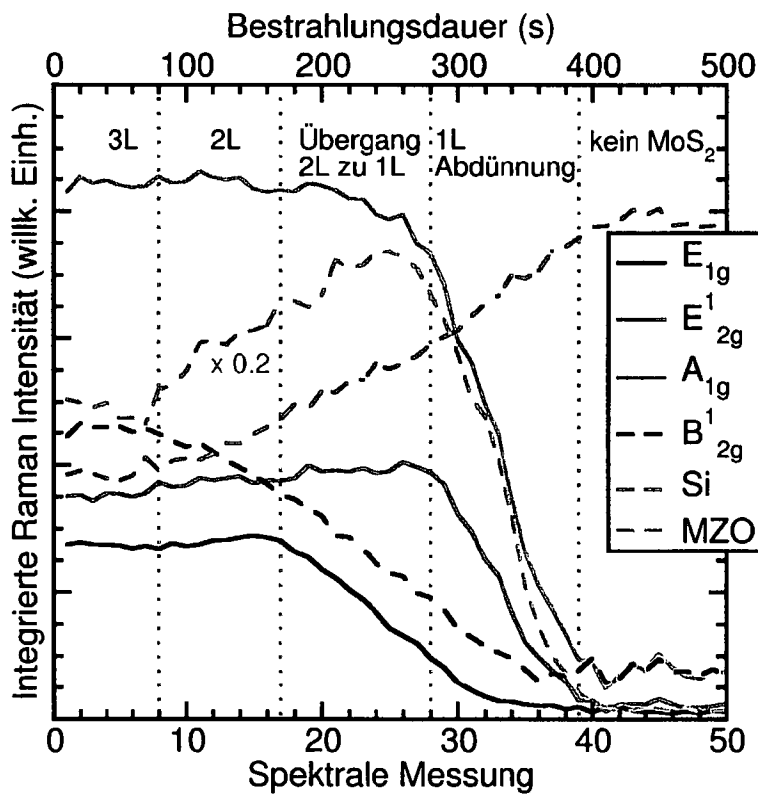


Fig. 2