

*Газдиева Ханифа Алаудиновна
студентка 2 курса магистратуры,
физико-математический факультет
Ингушский государственный университет,
Россия, г. Магас
e-mail: emta9333@mail.ru*

*Научный руководитель: Нальгиева М.А.,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры общей физики
Ингушский государственный университет,
Россия, г. Магас.*

ЗАВИСИМОСТЬ СТРУКТУРНЫХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО КРЕМНИЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

***Аннотация:** В статье автор дает понятие аморфного гидрогенизированного кремния и рассматривает структурные и электрофизические свойства его пленок. Также проанализирована степень влияния параметров лазерного излучения на свойства пленок аморфного гидрогенизированного кремния.*

***Ключевые слова:** физика, аморфный гидрогенизированный кремний, лазерное излучение, электрофизические и структурные свойства.*

*Gazdieva Hanifa Alaudinovna
2st year master student,
Faculty of Physics and Mathematics
Ingush State University,
Russia, Magas*

*Scientific adviser: Nalgieva M.A.,
candidate of physical and mathematical sciences,
Associate Professor of the Department of General Physics
Ingush State University,
Russia, Magas*

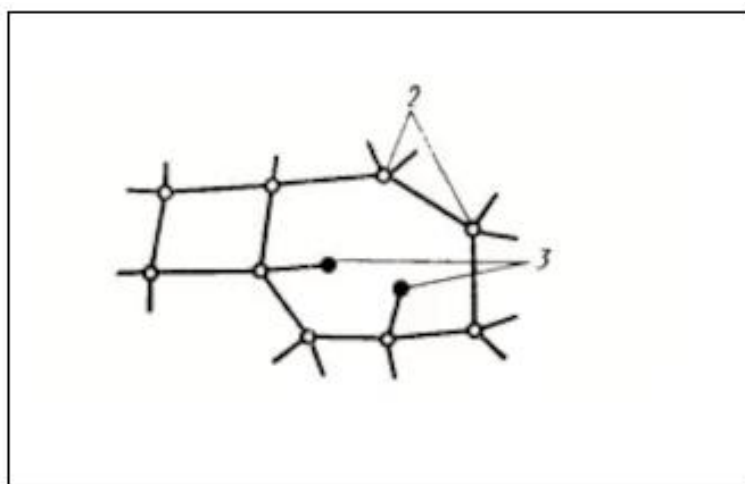
DEPENDENCE OF STRUCTURAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF AMORPHOUS HYDROGENATED SILICON FILMS ON LASER RADIATION PARAMETERS

Abstract: In the article, the author gives the concept of amorphous hydrogenated silicon and considers the structural and electrophysical properties of its films. The degree of influence of laser radiation parameters on the properties of films of amorphous hydrogenated silicon is also analyzed.

Keywords: physics, amorphous hydrogenated silicon, laser radiation, electrophysical and structural properties.

Аморфный кремний, который содержит водород, называется гидрогенизированным аморфным кремнием и обозначается следующим образом: α -Si:H. Осуществление нейтрализации оборванных связей посредством участия в данном процессе молекулярного водорода является невозможным, а для того чтобы разорвать связи H-H, необходимо достаточное количество энергии. Вследствие этого реакцию гидрогенизации рекомендуется проводить в водородной плазме, которая содержит значительный объем активного атомарного водорода.

Атомы водорода настолько малы, что в процессе повышения температур они начинают диффундировать в объем аморфной пленки, за счет пассивации оборванных связей на внутренних поверхностях микрополостей. Посредством водородной пассивации ненасыщенных связей на несколько порядков сокращается плотность локализованных состояний внутри щели подвижности (рис. 1).



**Рисунок 1. Фрагмент аморфного гидрогенизированного кремния
(2 – атом кремния, 3 – атом водорода)**

Чаще всего нелегированные пленки аморфного гидрогенизированного кремния имеют концентрацию глубоких уровней в границах от 10^{22} м^{-3} до 10^{23} м^{-3} . Минимальное значение плотности локализованных состояний достигается при наличии энергии непосредственно рядом с центром щели подвижности заряда [1, с. 62].

Необходимо отметить, что науке известно достаточно большое количество способов и методов напыления для получения аморфных пленок кремния. Однако большинство из них до сегодняшнего дня редко использовались на практике по причине того, что отсутствовали обоснованные возможности для управления их электрическими свойствами. Аморфные полупроводники (АП) в отличие от аморфных металлов (АМ) не характеризуются плотной упаковкой частиц; они состоят из атомов, которые связаны ковалентным типом связи и образуют открытую трехмерную сетку.

Для полупроводников с аморфной структурой характерны неизменные расстояния между ближайшими атомами. При этом в расстояниях до атомов второй координационной сферы имеется существенный разброс значений, который обусловлен флуктуацией валентных углов. Незначительные отклонения в межатомных расстояниях могут привести к полной утрате трансляционной симметрии на расстояниях в несколько координационных сфер.

Такое качество, как ближний порядок в расположении атомов, во многом влияет на ключевые характеристики материалов. Однако отсутствие дальнего порядка тоже не является фактором, исключающим рациональное существование энергетических зон, но ведет к значительному перераспределению в них разрешенных энергетических состояний.

Ключевыми достоинствами $\alpha\text{-Si:H}$ по сравнению с монокристаллическим кремнием является более высокое поглощение и фоточувствительность в зоне солнечного спектра. Это дает возможность применять тонкие фоточувствительные слои в процессе создания солнечных элементов, что, в свою очередь, значительно уменьшает их конечную стоимость. Помимо этого тонкие

пленки α -Si:H могут быть получены практически на любых подложках, в том числе гибких, и позволяют создавать устройства больших площадей.

Дополнительным плюсом является радиационная устойчивость материала, обеспечивающая стабильную работу приборов при жестком воздействии ионизирующего излучения.

Структурными, оптическими, электрофизическими, фотоэлектрическими свойствами обладают пленки аморфного гидрогенизированного кремния. Существует идеализированная модель структуры чистого аморфного кремния, которая выглядит как случайная сетка атомов. Для аморфного кремния (аналогично кристаллическому) характерно тетраэдрическое расположение атомов, но при этом области с упорядоченной структурой по своим размерам сопоставимы с межатомными расстояниями.

По итогам длительного изучения аморфного кремния при помощи метода электронографии было выявлено, что в процессе насыщения аморфного кремния водородом радиальная функция расположения атомов меняется незначительно. Лишь в случае рассмотрения пленок α -Si:H, осаждаемых в тлеющем разряде, проявляется дополнительный пик функции расположения, который находится на расстоянии примерно $r=0,5$ нм от того атома, который принят за начало отсчета.

Наличие данного пика, соответствующего значению угла между связями 45° , дало ученым основание полагать, что пленки α -Si:H, создаваемые в тлеющем разряде, имеют более совершенный ближний порядок структуры, чем пленки аморфного кремния, которые созданы методом вакуумного испарения.

Рассмотрим электрофизические свойства пленок аморфного гидрогенизированного кремния. Исследования электрофизических свойств пленок α -Si:H показали, что после обработки фемтосекундным лазерным излучением величина удельной проводимости α -Si:H выросла на 3 порядка с $\sim 10^{-9}$ до $\sim 10^{-6}$ (Ом·см) $^{-1}$. Это явление обусловлено нанокристаллизацией пленки: так, под действием сверхкоротких импульсов высокой мощности образуются кремниевые нанокристаллы с достаточно умеренной степенью проводимости.

В таблице 1 представлена информация об удельной проводимости пленки аморфного кремния до и после облучения лазерными импульсами.

Таблица 1.

Удельная проводимость пленки аморфного кремния до и после лазерного излучения

Образец	Удельная проводимость σ , (Ом·см) ⁻¹
Облученная область, контакты параллельны полосам сканирования и ППС	$(1,57 \pm 0,08) \cdot 10^{-6}$
Облученная область, контакты перпендикулярны полосам сканирования и ППС	$(4,47 \pm 0,03) \cdot 10^{-6}$
Аморфный кремний	$(6,72 \pm 0,15) \cdot 10^{-9}$

Мы видим, что удельная проводимость пленки аморфного кремния до и после лазерного излучения отличается. Причиной данного факта может являться неравномерная кристаллизация α -Si:H в полосе сканирования, что происходит вследствие неоднородности распределения энергии в поперечном сечении пучка лазерного излучения. Также это может быть связано с имеющейся анизотропией формы сформированных поверхностных периодических структур (ППС). Данные структуры имеют вид поверхностных решёток микронного масштаба (рис. 2).

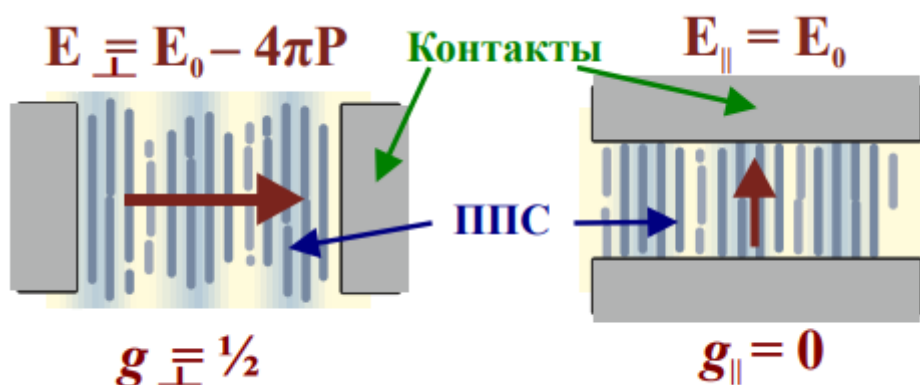


Рисунок 2. Воздействие анизотропии рельефа на характер деполяризации электрического поля в модифицированной пленке α -Si:H

Исследователи обнаружили анизотропию проводимости облученной поверхности: вдоль направления сканирования пленки лазерным лучом значение удельной проводимости почти в 3 раза превышает величину удельной проводимости для перпендикулярного сканированию направления.

Назначение неоднородной кристаллизации полосы сканирования от центра к краю состоит в том, что она гарантирует высокую степень проводимости вдоль линии сканирования за счет наличия в данном направлении явно выраженных нанокристаллических каналов. В то же время в ортогональном направлении наблюдается чередование областей с высокой и низкой степенью кристалличности.

Подобная анизотропия проводимости пленок α -Si:H вследствие их неравномерной кристаллизации наблюдалась также в работе. При этом на поверхности наблюдалось и формирование одномерных ППС в виде вытянутых кластеров нанометрового масштаба. Данные кластеры разделены зазорами, формируемыми в результате абляции пленки в процессе лазерной модификации [3, с. 56].

Согласно данным научных исследований, анизотропия проводимости в модифицированной пленке α -Si:H может быть вызвана именно данными зазорами, поскольку в местах их формирования толщина пленки уменьшается, и сопротивление данного участка пленки увеличивается. Поэтому рост сопротивления пленки в случае, когда ориентация штрихов ППС ортогональна направлению протекания электрического тока, может быть связан с большим вкладом зазоров между кластерами в измеренную проводимость, так как в ортогональном ориентации ППС направлении такие зазоры встречаются чаще, чем вдоль штрихов ППС [2, с. 10].

Однако следует отметить, что неоднородность толщины пленки вследствие неравномерной абляции сильнее проявляется для более тонких пленок, когда относительная вариация толщины пленки при формировании

периодического поверхностного рельефа будет больше. То есть, для более толстой пленки α -Si:H (600 нм) данный эффект будет проявляться меньше.

Пленки α -Si:H, которые прошли обработку лазерными импульсами, имеют определенные специфические особенности. Одной из них является тот факт, что в значительной степени увеличивается коэффициент их поглощения. Это объясняется многочисленными отражениями света, падающего от границ нанощероховатостей, которые в свою очередь формируются на поверхности самих пленок. Экспериментальным путем выяснено, что плотность шероховатостей поверхности в существенной мере влияет на характер и скорость поглощения пленок α -Si:H, модифицированных лазерным облучением [5, с. 83].

Нужно отметить, что изменение удельного веса кристаллической фазы для данных образцов не является существенным, поскольку при выбранных условиях обработки пленки сохраняются преимущественно аморфными. После лазерной обработки наиболее высокий коэффициент поглощения на длине волны 1600 нм имеет образец, облучённый при плотности энергии лазерных импульсов 0,5 Дж/см², затем 1,4 Дж/см² и 1,2 Дж/см². Это означает, что коэффициент поглощения обратно пропорционален высоте нанощероховатостей.

Если пленки α -Si:H облучать лазерными импульсами, то это неизменно ведет к тому, что меняется оптическая ширина запрещенной зоны материала. Поэтому часто проводятся теоретические расчеты для пленок двухфазного кремния. Суть данных расчетов заключается в том, что происходит постепенное сокращение ширины запрещенной зоны и увеличение удельного веса кристаллической фазы в пленках.

Данная тенденция хорошо наблюдается для пленок с толщиной 500 нм. Для более тонких пленок наблюдалась обратная зависимость в некотором диапазоне плотности энергии облучения. Это чаще всего связано с тем, что содержание водорода в пленках отличается. Аналогичная пропорциональность

между оптической шириной запрещенной зоны и концентрацией водорода в пленке была установлена в ходе научных экспериментов [4, с. 16].

Таким образом, кристаллизация пленок α -Si:H сверхбыстрыми лазерными импульсами – это важная прогрессивная технология, которая значима и с научной, и с практической точек зрения. В то время как исследование структуры лазерно-модифицированных пленок α -Si:H в большом объеме представлены в научной литературе, данные об электрических, фотоэлектрических и оптических свойствах подобных пленок практически отсутствуют. Поэтому изучение влияния структурных модификаций, вызванных лазерной обработкой α -Si:H, на электронные процессы, определяющие генерацию, рекомбинацию и транспорт носителей заряда в материале, является важной задачей.

Список литературы:

1. Алпатов А.В. Исследование корреляционных свойств структуры поверхности плёнок α -Si:H с различной долей кристаллической фазы // ФТП. 2016. № 5. С. 60-66.
2. Амасев Д.В. Анизотропия оптических, электрических и фотоэлектрических свойств модифицированных фемтосекундным лазерным облучением плёнок аморфного гидрогенизированного кремния // ЖТФ. 2017. № 6. С. 9-13.
3. Грибов Б.Г. Способ получения кремния высокой чистоты // Фундаментальные исследования. 2016. № 2. С. 56-59.
4. Нежданов А.В. Морфология поверхности и электрофизические свойства структурно-неоднородного аморфного кремния // Вестник Нижегородского университета им. В.И. Лобачевского. 2014. № 1. С. 16-21.
5. Хенкин М.В. Влияние условий получения плёнок полиморфного кремния на их структурные, электрические и оптические свойства // ФТП. 2013. № 9. С. 83-87.