

Исследование влияния электронного облучения на структуру GaSe–SiO₂ спектроскопическими методами

© Т.Д. Ибрагимов[¶], Э.А. Джафарова, З.Б. Сафаров*

Институт физики Азербайджанской национальной академии наук,
370143 Баку, Азербайджан

* Гянджинский государственный университет,
374700 Гянджа, Азербайджан

(Получена 11 декабря 2001 г. Принята к печати 21 декабря 2001 г.)

Методами оже-спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света исследована структура GaSe–SiO₂ до и после облучения электронами с энергией 4.0 МэВ и дозой облучения $3.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Показано, что после облучения толщина переходного слоя структуры уменьшается, а окисная пленка становится более однородной. Объяснением одной из причин таких изменений может служить радиационно-стимулированное геттерирование атомов галлия к границе раздела структуры, играющей роль стока.

Известно, что радиационные дефекты существенно изменяют электрофизические свойства полупроводниковых кристаллов, если их концентрация сравнима или превышает концентрацию исходных дефектов, возникающих при технологических процессах. Наряду с накоплением радиационных дефектов под действием облучения происходит также их движение к стокам и приближение системы к равновесному состоянию. В связи с этим в некоторой области доз облучения возможно проявление структурно-примесного упорядочения кристалла. Наиболее ярко подобное явление может проявить себя вблизи поверхности и границы раздела полупроводниковых структур, поскольку именно они сильно насыщены стоками и центрами аннигиляции дефектов [1].

Гетероструктуры на основе слоистых полупроводниковых кристаллов занимают особое место в физике полупроводников. Высокое совершенство поверхности, не требующей специальной обработки, и малая плотность поверхностных состояний делает их идеальным объектом для исследования барьерных структур, например, типа диэлектрик–полупроводник. К числу таких структур относится GaSe–SiO₂, компоненты которой химически не взаимодействуют. Ранее [2] были исследованы электрофизические свойства структуры GaSe–SiO₂, облученной быстрыми электронами с энергией 4.0 МэВ при различных дозах облучения. Было показано, что максимальная величина изменения энергии активации носителей и минимальное значение обратного тока при эмиссии Шоттки достигается при дозе облучения $3.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, что косвенно указывает на более резкую границу раздела GaSe–SiO₂.

В настоящей работе методами электронной оже-спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) исследуется структура GaSe–SiO₂ до и после облучения быстрыми электронами с энергией 4.0 МэВ и дозой облучения $3.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Слоистые кристаллы ε -GaSe были выращены методом Бриджмена в эвакуированных кварцевых ампулах. Благодаря слабым межслоевым связям, кристаллы GaSe

легко скалывались на плоскопараллельные пластины толщиной 100–300 мкм. Пленки SiO₂ осаждались на эти пластины пиролитическим методом в атмосфере нейтрального газа аргона на промышленной установке Изотрон-6. Основная часть этой установки состоит из реакционной кварцевой камеры, нагреваемой в трехзонной печи. В этой камере с помощью термостатирующего регулятора поддерживается постоянство температуры кипения 467°C элементоорганического соединения тетраэтоксилан Si(OC₂H₅)₄. Через камеру пропускаться газ-носитель, состоящий из смеси азота и кислорода. Газ-носитель, насыщенный парами тетраэтоксилана, поступал в реакционную зону, где это соединение разлагалось при $T = 680\text{--}780^\circ\text{C}$, образуя на подложке окисную пленку. Подбирая скорость газа-носителя и температуру подложки в пределах 250–460°C, регулировали скорость осаждения пленки, а также ее состав. Формируемые пленки SiO₂ осаждались со скоростью 0.1 нм/с и имели конечные толщины в пределах 0.4–3.0 мкм. Контроль стехиометрического состава полученных пленок SiO₂ производился по характерной полосе поглощения с максимумом при частоте 1080 см^{-1} (валентные колебания Si–O–Si) [3] в спектрах поглощения на инфракрасном спектрофотометре Specord-75IR. По мере необходимости структуры облучались быстрыми электронами с энергией 4.0 МэВ и дозой облучения $3.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Для получения оже-спектров использовался двухкамерный спектрометр ИОС-09. Вакуум при проведении измерений составлял 10^{-10} Торр. Очистка поверхности в вакууме и распыление до глубины 3.0 мкм при послойном анализе проводились пучками ионов аргона.

Спектры КРС до и после облучения структур GaSe–SiO₂ регистрировались на спектрометре ДФС-52. Для возбуждения спектров КРС использовалась линия 514.5 нм аргонового лазера. Возбужденный свет падал под небольшим углом на окисную пленку. Рассеянное излучение собиралось с помощью конденсора и детектировалось по ту же сторону структуры GaSe–SiO₂. При таких условиях возбуждающий свет практически не поглощался пленкой SiO₂, но сильно поглощался пластиной GaSe. В связи с этим спектры

[¶] E-mail: physic@lan.lab.az

Частоты фононов в спектрах КРС пластины GaSe, а также структуры GaSe-SiO₂ до и после облучения быстрыми электронами

Мода	GaSe, см ⁻¹	GaSe-SiO ₂	
		до облучения см ⁻¹	после облучения см ⁻¹
E_1'	19.5	20.5	21.5
E_1''	60.0	60.0	60.0
A_1'	134.0	134.0	134.0
E_2''	211.0	211.0	211.0
$E_2'(LO)$	252.0	—	—
A_2'	306.0	306.0	306.0

КРС формировались только от пленки SiO₂, границы раздела структуры и тонкого приповерхностного слоя GaSe [4]. Для сравнения при той же конфигурации эксперимента спектры КРС снимались и от свободной поверхности GaSe. Разрешение и точность определения частот линий КРС были не хуже 0.5 см⁻¹.

На рис. 1 приведены профили распределения элементов по глубине, рассчитанные и построенные из оже-спектров. Анализ показывает, что в некоторой переходной области (ПС) происходит замещение атомов кислорода на атомы селена, а также в основном свободных атомов кремния атомами галлия, проникающих в аморфную пленку SiO₂. После облучения структуры высокоэнергетическими электронами в распределении элементов происходят существенные изменения. В частности, при толщине диэлектрической пленки SiO₂, равной 2.4 мкм, толщина ПС после облучения уменьшается почти в 3 раза. Общая толщина окисной пленки и ПС до и после облучения остается неизменной, что указывает на образование ПС за счет аморфной пленки SiO₂. После облучения профиль распределения элементов в SiO₂ становится более плавным, что свидетельствует о более равномерном распределении элементов в окисной пленке.

В таблице приведены частоты линий КРС структуры GaSe-SiO₂ до и после облучения быстрыми электронами. Для сравнения в той же таблице даны частоты фононов необлученной свободной поверхности GaSe и соответствующая им общепринятая классификация мод. В спектрах GaSe наблюдаются линии, соответствующие модам E_1' , E_1'' , A_1' , E_2'' и $E_2'(LO)$. Первая из этих мод соответствует межслоевым, а остальные внутрислоевым колебаниям GaSe. Наличие пленки SiO₂ приводит к усилению интенсивности релеевского рассеяния, что, по видимому, связано с дефектностью детектируемой приграничной области структуры. При этом также уменьшается интенсивность $E_2'(LO)$ моды GaSe до пределов возможной уверенной регистрации интенсивности и формы соответствующей линии. Данный факт свидетельствует о рассеянии продольного фонона на заряженных центрах вдоль границы раздела структуры GaSe-SiO₂ и перекликается с ранее проведенной работой [5]. Кроме того,

частота межслоевой моды в пределах ошибки измерения незначительно увеличивается. Форма соответствующей линии приобретает сложный характер, свидетельствующий о дефектности приграничного слоя GaSe и наличии других модификаций GaSe (рис. 2).

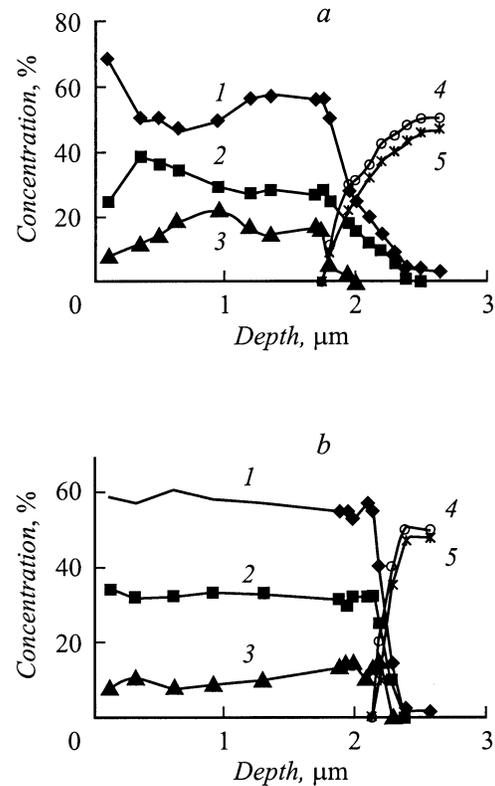


Рис. 1. Профили распределения элементов по глубине структуры GaSe-SiO₂ до (a) и после (b) облучения электронами с энергией 4.0 МэВ и дозой облучения $3.0 \cdot 10^{15}$ см⁻²: 1 — кислород, 2 — свободный кремний, 3 — связанный кремний, 4 — галлий, 5 — селен.

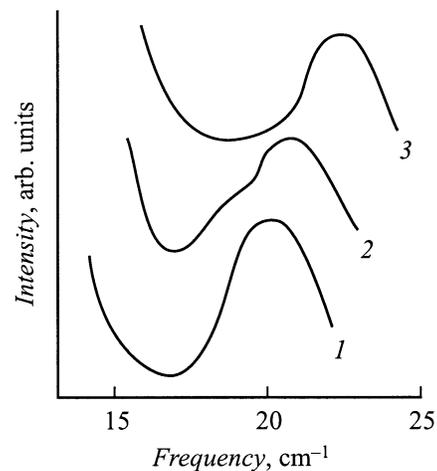


Рис. 2. Спектры КРС в окрестности межслоевой моды: 1 — пластина GaSe, 2 — структура GaSe-SiO₂ до облучения, 3 — структура GaSe-SiO₂ после облучения.

При облучении структуры быстрыми электронами интенсивность релеевского рассеяния уменьшается из-за уменьшения дефектности границы раздела GaSe–SiO₂. Частоты внутрислоевых мод не изменяются, в то время как частота межслоевой моды увеличивается еще больше. Надо отметить, что межслоевая мода GaSe очень чувствительна к различным воздействиям. Так, например, параметр Грюнайзена для этой моды в 20 раз больше, чем для остальных мод [6]. При уменьшении толщины пленки GaSe именно частота межслоевой моды уменьшается вследствие уменьшения электростатической энергии между слоями [7]. В нашем случае увеличение частоты межслоевой моды свидетельствует об увеличении механического напряжения между пленкой SiO₂ и пластиной GaSe в связи с уменьшением толщины ПС, что подтверждает результаты исследований оже-спектров.

Известно, что в образовании ПС главную роль играют сложные дефекты, которые представляют собой комплексы структурных дефектов с адсорбированными на них примесями обеих компонент структуры, а также дефекты кластерного типа. При этом эти образования в свою очередь могут являться центрами аннигиляции более простых дефектов. В связи с этим одним из механизмов уменьшения толщины ПС после облучения может служить то, что высокоэнергетические электроны выбивают атомы кремния из узла решетки. Последние в свою очередь вытесняют атомы замещения галлия в межузельное положение. Благодаря достаточно высокому значению эффективного коэффициента радиационно-стимулированной геттеродиффузии [8] атомы галлия стекаются к границе раздела структуры, выполняющей роль стока. Взаимодействие сложных дефектов границы с простыми, геттерированными из объема, в частности с межузельными атомами галлия, способствует перестройке первых и аннигиляции последних, приводящей к общему упорядочению системы.

Список литературы

- [1] Н.Л. Дмитрук, В.Г. Литовченко. Оптоэлектрон. и полупроводн. техн., № 3, 13 (1983).
- [2] З.А. Сафаров, М.Г. Шахтагинский. ДАН Азербайджана. Сер. физ.-мат. и техн. науки, **47**, № 12, 34 (1991).
- [3] A.L. Shabalov, M.S. Feldman. Thin Sol. Films, **151**, 317 (1987).
- [4] T.D. Ibragimov, G.G. Kurbanova, V.S. Gorelik. Phys. St. Sol. (b), **155**, 113 (1989).
- [5] А.Г. Абдуллаев, Т.Д. Ибрагимов. ФТТ, **28**, 2565 (1986).
- [7] J.M. Besson. Nuovo Cimento. Ser. B, **33**, 488 (1977).
- [8] В.С. Горелик, А.Г. Абдуллаев, Т.Д. Ибрагимов. Поверхность. Физика, химия, механика, № 4, 55 (1988).
- [9] О.Ю. Борковская, Н.Л. Дмитрук, В.Г. Литовченко, О.М. Минщук. ФТП, **23**, 207 (1989).

Редактор Л.В. Беляков

Investigation of the influence of electron irradiation of a GaSe–SiO₂ structure by spectroscopic methods

T.D. Ibragimov, E.A. Jafarova, Z.B. Safarov*

Institute of Physics, Azerbaijan National Academy of Sciences,
370143 Baku, Azerbaijan
* Gyanja State University,
374700 Gyanja, Azerbaijan

Abstract A GaSe–SiO₂ structure before and after irradiation by electrons with the energy 4.0 MeV and the dose of irradiation — $3.0 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ has been investigated by Auger and Raman spectroscopy methods. It has been shown that the thickness of the transition region of the structure reduces while the oxide film becomes more homogeneous. As an explanation of one of the reasons for these changes the authors suggest the radiation stimulated hettering of gallium atoms towards the structure interface playing the part of a drain.