

Կ.Հ. ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ, Ն.Բ. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ

**ԴԻԷԼԵԿՏՐԻԿԱԿԱՆ ՍԱՀՄԱՆԱՓԱԿՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՔՎԱԶԻՄԻԱԶԱՓ
ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ԳԱԶՈՎ ՊԱՅՄԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ԷԿՐԱՆԱՎՈՐՄԱՆ ԿՐԱ
ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԶԱՅԻՆ ՔՎԱՆՏԱՅԻՆ ԼԱՐԵՐՈՒՄ**

Թոմաս-Ֆերմիի մեթոդի կիրառմամբ քննարկված է էկրանավորման երևույթը արգել-քային միջավայր ներառված կիսահաղորդչային քվանտային լարերում: Դիէլեկտրական սահմանափակման երևույթի հաշվառումով առաջին անգամ ստացված են ինչպես էկրանավորման եռաչափ փոխազդեցության պոտենցիալի, այնպես էլ քվազիմիաչափ էկրանավորման փոխազդեցության պոտենցիալի և էկրանավորման երկարության բանաձևերը:

Առանցքային բաներ. քվանտային լար, էկրանավորում, փոխազդեցության պոտենցիալ:

К.Г. АГАРОНЯН, Н.Б. МАРГАРЯН

**ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ НА
ЭКРАНИРОВАНИЕ С КВАЗИОДНОМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ НИТЯХ**

С применением метода Томаса-Ферми исследовано явление экранирования в полупроводниковых квантовых нитях, вкрапленных в барьерную среду. С учетом явления диэлектрического ограничения впервые получены выражения как для потенциала трехмерного экранированного взаимодействия, так и для квазиодномерного потенциала взаимодействия и длины экранирования.

Ключевые слова: квантовая нить, экранирование, потенциал взаимодействия.

УДК 533.9:621.38

Д.Б. АЙРАПЕТЯН, Ж.Р. ПАНОСЯН, Ю.Ж. ТУЛЕУШЕВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫМ АМОРФНЫМ КРЕМНИЕМ, ЛЕГИРОВАННЫМ
НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА**

Исследованы особенности процесса одновременного магнетронного напыления на подложку поликристаллического кремния и серебра. Получены покрытия из аморфного кремния с распределенными в нем наночастицами серебра, а также электронно-микроскопические и атомно-силовые снимки этих покрытий. Исследования комбинационного рассеяния спектров полученных пленок показали усиление рассеяния колебательных мод пленок аморфного кремния с наночастицами серебра.

Ключевые слова: аморфный кремний, наночастицы серебра, комбинационное рассеяние.

Введение. В последние годы интенсивно разрабатываются тонкопленочные солнечные элементы (СЭ). Традиционные монокристаллические кремниевые подложки заменены здесь пленками аморфного кремния толщиной 0,5...1 мкм

против 300 *мкм* в классических СЭ, где также используется антиотражающий слой [1]. На тонкопленочный элемент расходуется в сотни раз меньше кремния, что сильно уменьшает стоимость СЭ. Однако уменьшение толщины СЭ снижает КПД преобразования, причем в первую очередь, из-за того, что слой толщиной в несколько десятков или даже сотен нанометров не способен полностью поглотить падающую на него солнечную энергию. В результате эффективность преобразования уменьшается в несколько раз по сравнению с кремниевыми СЭ на монокристаллической подложке. Основная идея, интенсивно исследуемая в последнее время и имеющая целью увеличение доли излучения, поглощаемого в тонкой пленке, состоит в использовании “синего” сдвига спектра падающего излучения, обусловленного рассеянием фотонов на поверхностных плазмонах. Смысл сказанного состоит в том, что если на поверхность материала наносятся наночастицы металла (Al или Ag), то появляется возможность значительного увеличения эффективности преобразования тонкопленочных СЭ за счет трех основных факторов [2-4]: антиотражение, увеличение длины оптического пути излучения за счет его рассеяния металлом под большими углами, “синий” сдвиг спектра падающего излучения благодаря рассеянию на поверхностных локализованных плазмонах. Величина сдвига зависит от распределения и геометрии наночастиц металла на поверхности, и при определенных условиях резонансная частота рассеянного на плазмонах излучения может быть скоррелирована с шириной запрещенной зоны аморфного кремния. Это означает, что часть излучения с энергией фотонов, меньшей ширины запрещенной зоны аморфного кремния, может быть эффективно поглощена. Данная статья посвящена исследованию усиления комбинационного рассеяния (КР) тонкопленочного аморфного кремния, легированного наночастицами серебра.

Технология. В качестве базовой была выбрана технология получения тонких слоев (5...10 *мкм*) аморфного кремния с помощью химического парофазного осаждения кремния непосредственно на тонкую металлическую подложку фотоэлемента. При этом раскалённая вольфрамовая нить нагревает газообразный SiHCl_3 (или SiH_4) в вакуумной камере до 700 °С, после чего газ разлагается, оставляя на тонкой металлической плёнке слой от 5 до 10 *мкм*. Покрытия из аморфного кремния с распределёнными в нем наночастицами серебра были получены одновременным магнетронным распылением и осаждением на подложку обоих материалов [5]. В качестве мишеней были использованы поликристаллический кремний в одном магнетроне и металлическое серебро (99,99 мас.% основного элемента) в другом. Мишени представляли собой диски диаметром 40 *мм* и толщиной 4 *мм*. Для обеспечения равномерности состава покрытия подложки были размещены на карусельном устройстве с возможностью поочередного прохождения через потоки распыляемых материалов.

В качестве подложки была выбрана пластина из монокристаллического кремния р типа с удельным сопротивлением $10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и толщиной 350 нм. Выбор пластины кремния в качестве подложки обусловлен необходимостью первоначальной отработки технологических режимов синтеза структуры фотоэлемента (работа со структурами толщиной в доли микрона требует специального технологического оборудования). На подложку нанесены легированный донорами тонкий слой однородного аморфного кремния и покрытие с наноклапями серебра в кремниевой матрице. С лицевой стороны на аморфный кремний нанесен слой ИТО с целью обеспечения антиотражения и эффективного собирания генерированных светом носителей. На слой ИТО нанесены островки металла, служащие контактными площадками. С тыльной стороны нанесен сплошной слой металла для второго контакта.

Результаты. При исследовании покрытия с содержанием кремния 62,8 ат. % было установлено, что в данном покрытии примесь (в данном случае это серебро) собирается в нанокластеры [5]. Нарис.1 представлен электронно-микроскопический снимок покрытия. В покрытии с содержанием кремния 75,8 ат. % (содержание серебра 24,2 ат. %) обнаружены нанокластеры серебра в кремниевой матрице. На поверхности образовался кристаллит в виде правильного шестигранника. Из рисунка видно, что средний размер кластеров серебра составляет 15...20 нм, а самые крупные кластеры доходят до размера 30 нм.

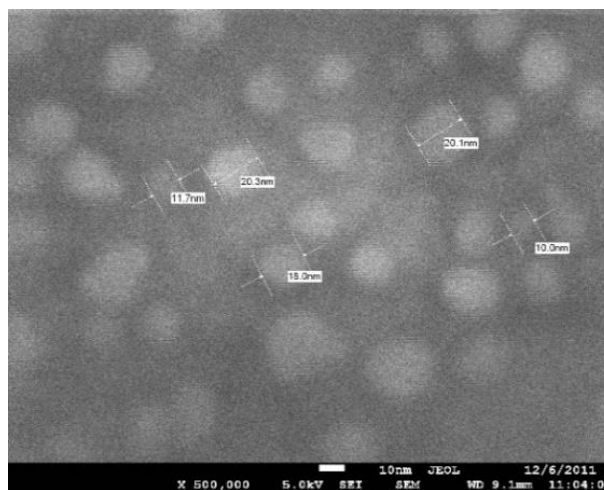


Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок покрытия из аморфного кремния с 24,2 ат. % Ag

С помощью АСМ были проведены морфологические исследования поверхности пленок, синтезированных с различным содержанием в них серебра. АСМ снимки, приведенные на рис. 2, подтверждают, что при большом содержании

серебра оно просто кристаллизуется на поверхности, уменьшая фоточувствительную поверхность и увеличивая отражающую способность поверхности. При малых же концентрациях оно действительно собирается в капли, однако с неконтролируемым расстоянием между ними.

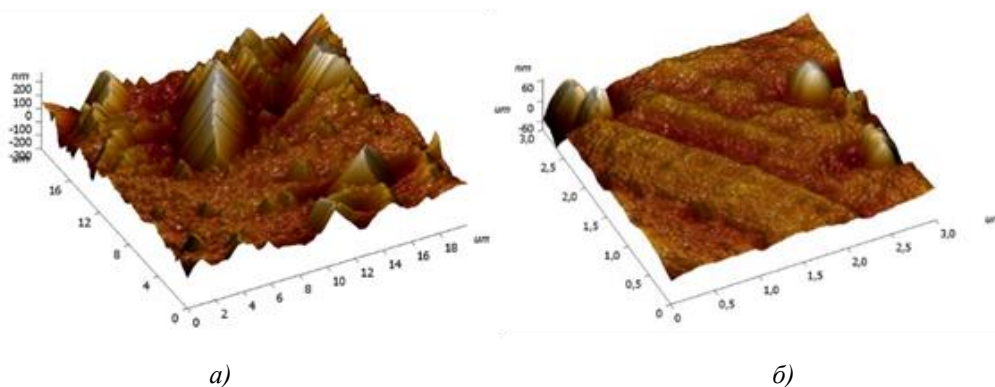


Рис. 2. АСМ снимки поверхности нанесенных на кремниевую подложку пленок аморфного кремния с различным содержанием серебра:
а – 27,8% Ag, б – 8,8% Ag

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (или рамановская спектроскопия) - эффективный неразрушающий метод физико-химического анализа, изучения состава и строения веществ. Комбинационное рассеяние света (эффект Рамана) - неупругое рассеяние оптического излучения на молекулах вещества (твёрдого, жидкого или газообразного), сопровождающееся заметным изменением частоты излучения. В отличие от рэлеевского рассеяния, в случае комбинационного рассеяния света в спектре рассеянного излучения появляются спектральные линии, которых нет в спектре первичного (возбуждающего) света. Число и расположение появившихся линий определяются молекулярным строением вещества [6]. Для доказательства того, что мы имеем дело с рассеянием на плазмонах, были исследованы КР спектры пленок аморфного кремния с содержанием серебра и без него, соответствующие многофононному рассеянию. КР спектры были получены с помощью рамановского спектрометра NTegra Spectra компании NT-MDT с длиной волны возбуждающего лазера $\lambda = 473 \text{ нм}$ и диаметром пятна 1 мкм . На рис. 3 приведены сравнительные диаграммы спектров КР аморфного кремния (кривая 1) и аморфного кремния с содержанием частиц серебра (кривая 2) с концентрацией 18,8 %. На кривой 1 пики 296 см^{-1} , 503 см^{-1} и 917 см^{-1} представляют собой характеристические моды спектра КР в аморфном кремнии. С увеличением концентрации серебра в образцах аморфного кремния в спектрах КР наблюдалось появление относительной интенсивности мод области полярных фононов по отношению к аморфному кремнию (кривая 2) [7]. Усиление мод 376 см^{-1} , 587 см^{-1} , которые

соответствуют усиленным полярным модам из-за наличия частиц серебра, ранее наблюдалось другими авторами [8,9]. Отметим, что мода 976 см^{-1} соответствует многофононным процессам. Максимум плазмонного поглощения в образцах с содержанием частиц серебра лежит в области $450\ldots 500\text{ нм}$. Таким образом, возникновение локальных плазмонных возбуждений приводит к интенсификации многофононных процессов в спектрах КР и доказывает усиление эффекта плазмонного поглощения при наличии серебра.

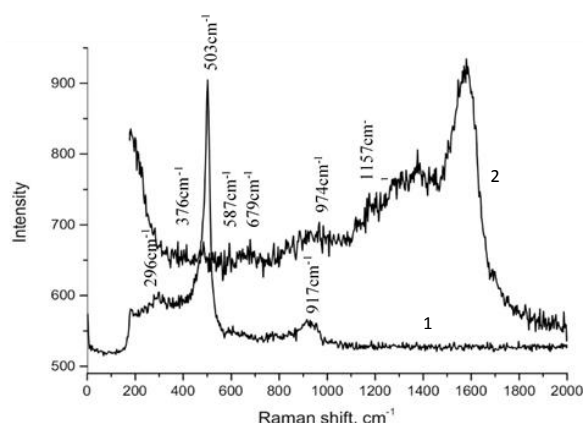


Рис. 3. Сравнительная диаграмма спектров КР аморфного кремния (1) и аморфного кремния с содержанием частиц серебра (2)

Выводы. Разработана технология производства тонкопленочных фотоэлементов на основе аморфного кремния, легированного наночастицами серебра. Исследование влияния технологических параметров на свойства аморфного кремния проводилось с помощью КР измерений. Одновременным магнетронным распылением и осаждением на подложку поликристаллического кремния и серебра были получены покрытия из аморфного кремния с распределенными в нем наночастицами серебра. При большом содержании серебра в распыляемой плазме поверхность покрытия получается однородной, кристаллитов одной фазы в другой не обнаруживается. При содержании серебра $<24,2\text{ ат.}\%$ обнаруживаются признаки образования нанокластеров серебра в кремниевой матрице. Факт образования наночастиц серебра подтверждается электронно-микроскопическими снимками покрытий и снимками, сделанными с помощью атомно-силового микроскопа.

О наличии эффекта комбинационного рассеяния свидетельствуют изменения в рамановских спектрах, измеренных на структурах с наличием серебра и без него. Дело в том, что сам процесс комбинационного рассеяния в диапазоне красного и ближнего ИК усиливает многофононные процессы, а это приводит к изменениям в рамановских спектрах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gharibyan A., Panosyan Zh.R., Yengibaryan Y., Abdul-Nagy A.** Preparation of new type of antireflection and contact coatings on the surface of Si PV cells // Proceedings of 25th European PV Solar Energy Confer. and Exhibition. -Spain, 2010. -P. 174.
2. **Vivian E. Ferry, Luke A. Sweatlock, Domenico Pacifici, and Harry A. Atwater.** Plasmonic Nanostructure Design for Efficient Light Coupling into Solar Cells // *Nano Lett.*-2008.-Vol.8. -P. 4391-4397.
3. Improved red-response in thin film a-Si:H solar cells with soft-imprinted plasmonic back reflectors / **V. Ferry, M. Verschuuren, et al** // *App. Phys. Lett.* -2009.-Vol.95.-P. 183503.
4. **Peng Hui Wang, Morgan Millard, and Alexandre G. Brolo.** [Optimizing Plasmonic Silicon Photovoltaics with Ag and Au Nanoparticle Mixtures](#) // *The Journal of Physical Chemistry C*.-2014.-Vol. 118 (11).-P.5889-5895.
5. **Тулешев Ю.Ж., Володин В.Н., Жаканбаев Е.А.** Солнечный элемент из аморфного кремния с наночастицами серебра // Труды 5-й Межд. конф. По возобн. И чистым источникам энергии.-Ереван, 2013. -С. 208-211.
6. **Hayrapetyan D.B., Hovhannisyan L.T., Mantashyan P.A.** Development of program package for investigation and modeling of carbon nanostructures in diamond like carbon films with the help of Raman scattering and infrared absorption spectra line resolving // *Proceedings of the SPIE*. -2013. -Vol. 8788. -P. 878825.
7. **Кайдашев В.Е., Лянгузов Н.В., Юзик Ю.И., Кайдашев Е.М.** Усиление комбинационного рассеяния локализованными плазмонами в наночастицах серебра на поверхности наностержней оксида цинка // *ЖТФ*. -2012. -Т. 82, вып.10. -С. 85-89.
8. **Alexon H., Glembocki O., Prokes S.** Plasmonic coupling on dielectric nanowire core-metal sheath composites // *Nanotechnology*, -2010.-Vol. 21.-P. 085705.
9. Anomalous enhanced Raman scattering from longitudinal optical phonons on Ag-nanoparticle-covered GaN and ZnO/C. **Liu, M. Dvoynenko, M. Lai, et al** // *Applied Phys. Lett.* -2010.-Vol. 96.-P. 033109.

Դ.Բ. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ժ.Ռ. ՓԱՆՈՍՅԱՆ, ՅՈՒ.Ժ. ՏՈՒԼԵՆՈՒՇԵՎ

ԱՐԾԱԹԻ ՆԱՆՈՄԱՍՆԻԿՆԵՐՈՎ ԼԵԳԻՐՎԱԾ ԱՄՈՐՖ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ԲԱՐԱԿ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԿՈՄԲԻՆԱՑԻՈՆ ՑՐՄԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Հետազոտվել են բազմաբյուրեղային սիլիցիումի և արծաթի միաժամանակյա մագնետրոնային փոշեցրման առանձնահատկությունները տակդիրի վրա: Ստացվել են ամորֆ սիլիցիումից ծածկույթներ՝ արծաթի նանոմասնիկների պարունակությամբ: Ստացվել են աճեցված թաղանթների էլեկտրոնային միկրոսկոպիկ և ատոմառաձային պատկերները: Ստացված թաղանթների կոմբինացիոն ցրման սպեկտրների հետազոտությամբ ցույց է տրվել արծաթի նանոմասնիկներով ամորֆ սիլիցիումի տատանողական մոդերի ցրման ուժեղացումը:

Առանցքային բառեր. ամորֆ սիլիցիում, արծաթի նանոմասնիկներ, կոմբինացիոն ցրում:

D.B. HAYRAPETYAN, Zh.R. PANOSYAN, Y.G. TULEUSHEV

RAMAN STUDY OF THIN-FILM AMORPHOUS SILICON DOPED WITH SILVER NANOPARTICLES

The peculiarities of the process of simultaneous magnetron sputtering on a substrate of polycrystalline silicon and silver are studied. Coatings from an amorphous silica dispersed therein with silver nanoparticles, as well as electron microscope images and atomic force microscope images of the coatings are obtained. Raman spectra study of the resulting films show increased scattering of the vibrational modes of amorphous silicon films with silver nanoparticles.

Keywords: amorphous silicon, silver nanoparticles, Raman scattering.

UDC 537.531

A.O. ABOYAN

X – RAY INTERFEROMETRIC INVESTIGATION OF STRUCTURAL DISTORTIONS IN SEMICONDUCTOR CRYSTALS UNDER THE INFLUENCE OF FAST ELECTRONS

An X-ray interferometric method for defining radiation pointed defects depending on the dose and depth of penetrating electron radiation using a three-crystal interferometer made of perfect silicon monocrystal with reflecting planes has been theoretically substantiated and experimentally realized (110). Relative deformations have been defined and the density of radiation defects depending on the radiation dose by fast electrons with energy 4,5 MeV has been calculated according to moiré patterns.

Keywords: interferometer, silicon monocrystal, density of radiation defects, radiation dose, moiré patterns.

1. Introduction. Investigations of physical material properties depending on the density of different radiation defects are expedient for obtaining substances with the given properties and, in particular, for the development of radiation resistant instrumentation. Silicon crystals are especially promising.

Structural imperfections arising in crystals at irradiation are mainly point defects, which, on the average, are evenly distributed in the bulk of the irradiated crystal. The observation of these defects and their distribution by means of ordinary radiographical methods is known to be a rather difficult problem. On the other hand, X - ray interferometrical methods are highly sensitive to such defects and have high resolution. On X- ray moiré pictures it is possible to discern even minute distortions of the crystal lattice and determine the density of point defects and their change within small ranges of the matrix. Hence, having in view the investigations of imperfections formed in crystals under irradiation, we took advantage of X- ray moiré patterns.

The aim of the present work is to investigate the structural distortions in semiconductor crystals irradiated, as well as 4,5 MeV electrons by means of the method of diffraction moiré.