

©1994 г.

ПСЕВДОЛЕГИРОВАННЫЙ АМОРФНЫЙ КРЕМНИЙ КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ МИШЕНЕЙ ВИДИКОНА

О.А.Голикова, М.М.Казанин, И.Н.Петров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия

(Получена 22 февраля 1994 г. Принята к печати 28 февраля 1994 г.)

Приводятся результаты исследований мишеней видикона, изготовленных на основе псевдолегированного аморфного кремния. Методом фототоков, ограниченных пространственным зарядом, определена функция плотности состояний в нижней половине щели подвижности. Определены корреляции характеристик мишени с параметрами ее *i*-слоя. Показано совпадение характеристик мишени на основе псевдолегированного и легированного аморфного кремния, отмечен ряд преимуществ метода псевдолегирования.

Работы по созданию мишеней видикона на основе аморфного гидрированного кремния (*a*-Si:H) развивались с начала 80-х гг. [1]. Были разработаны приборы, отличающиеся термостабильностью (рабочие температуры 25–90 °С), имеющие достаточно высокое разрешение (свыше 700 ТВ линий), высокую чувствительность 2000 мкА/лм (в 5 раз превышающую чувствительность сатиконов), инерционность 8%, темновые токи порядка единиц нА, малые размеры и вес, низкие величины потребляемой мощности [2,3]. Однако предлагаемая технология изготовления мишеней на основе *a*-Si:H обладала недостатками, которые, по-видимому, были причиной того, что видиконы с этими мишенями не получили широкого распространения.

Структура мишени видикона состояла из ряда слоев, последовательно нанесенных на стеклянную подложку: ITO, n^+ -*a*-Si:H, *i*-*a*-Si:H, Sb₂S₃ (As₂Se₃) либо легированный бором аморфный нитрид (карбид) кремния (рис. 1). Это, соответственно, были контактный, блокирующий инжекцию дырок, активный фоточувствительный и блокирующий инжекцию электронов слои. При этом наиболее жесткие требования должны предъявляться к *i*-слою. Это должен быть именно «собственный» *a*-Si:H, высокоомный и имеющий высокие величины произведения подвижности на время жизни дырок ($\mu\tau$)_p. Поскольку работу мишени определяет транспорт дырок, второе требование является решающим.

Как известно, получаемый ранее нелегированный *a*-Si:H имел проводимость *n*-типа: уровень Ферми (ϵ_F) был сдвинут на 0.1–0.2 эВ от

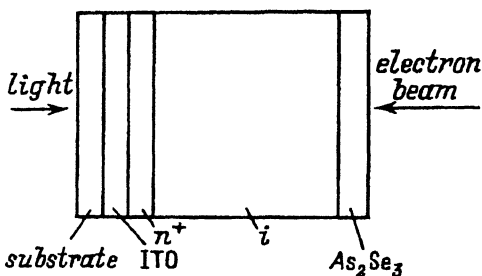


Рис. 1. Структура мишени видикона.

точки $E_g/2$ (E_g — щель подвижности) в сторону зоны проводимости; типичная величина энергии активации электропроводности (ΔE) составляла ~ 0.7 эВ [$\Delta E = (\epsilon_c - \epsilon_F)_{T=0}$, ϵ_c — край зоны проводимости]. Поэтому для получения «собственного» материала при использовании метода ВЧ разложения силансодержащих газовых смесей применялось очень слабое легирование бором (10 pp атомов В в газовой смеси), в результате которого получали α -Si:H, имеющий $\Delta E = 0.9$ эВ, $(\mu\tau)_p \simeq 10^{-8}$ см²/В, электропроводность $\sigma \simeq 10^{-12}$ Ом⁻¹·см⁻¹ при $T = 300$ К [4]. Такое прецизионное легирование с высокой стабильностью результатов осуществить достаточно сложно. Кроме того, для создания блокирующего n^+ -слоя α -Si:H легировали из газовой фазы фосфором. При изготовлении мишени применяли взрывоопасные и токсичные газы, такие как диборан и фосфин. Создавалась опасность загрязнения слоев нежелательными примесями, как попадающими из камеры во время процесса осаждения, так и в результате диффузии из слоя в слой. Исходя из вышесказанного, было предложено изготавливать слои α -Si:H для мишени видикона методом псевдолегирования [5].

Как известно, введение примесных атомов приводит к образованию дефектов — оборванных связей кремний–кремний в отрицательно и положительно заряженных состояниях при легировании донорами и акцепторами соответственно [6]. Было показано далее, что концентрация этих дефектов (N_D) в образцах n -типа является одной и той же функцией уровня Ферми как при легировании фосфором (примесь замещения), так и при легировании литием (примесь внедрения) [7]. Это приводит к предположению, что основным фактором здесь являются не валентность и характер локализации примесного атома в структурной сетке, а определенная модификация этой сетки, выражающаяся в образовании данной концентрации оборванных связей и, следовательно, данного положения уровня Ферми, характеризующего степень легирования. Однако очевидно, что оборванные связи могут быть созданы и в процессе роста пленки, например, за счет увеличения интенсивности ее бомбардировки ионами силановой плазмы (при получении пленок методом ВЧ разложения силановых смесей), увеличения температуры осаждения и др. Следовательно, если научиться управлять величиной концентрации оборванных связей в процессе роста пленки, можно рассчитывать осуществить сдвиги уровня Ферми и в отсутствие легирования: эта идея легла в основу развиваемого нами метода псевдолегирования.

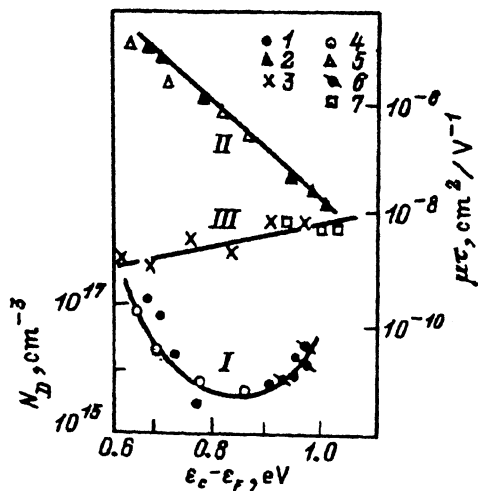


Рис. 2. Концентрация оборванных связей (I), $\mu\tau$ электронов (II) и дырок (III) в зависимости от положения уровня Ферми.

1-3 — псевдолегированный $a\text{-Si:H}$; 4, 5 — $a\text{-Si:H}$, легированный фосфором; 6, 7 — $a\text{-Si:H}$, легированный бором.

Метод был реализован при использовании триодной системы ВЧ разложения силановых смесей при вариациях положительного смещения на сетке относительно катода, где находилась подложка. При нулевом смещении интенсивность бомбардировки была минимальной, что приводило к минимальной концентрации оборванных связей и, соответственно, к нахождению уровня Ферми в середине щели подвижности (рис. 2). Здесь же показано, что не только концентрация дефектов (N_D), но и величина произведения подвижности на время жизни электронов и дырок являются функциями только уровня Ферми независимо от способа его достижения — легирования или псевдолегирования.

Следует еще раз подчеркнуть, что собственный $a\text{-Si:H}$ получается таким методом без прецизионного легирования бором и что по величинам $\mu\tau$, непосредственно определяющим диффузионную и дрейфовую длины носителей тока, псевдолегированный $a\text{-Si:H}$ не уступает легированному.

Представлялось интересным сравнить не только величины N_D , но и плотности состояний, $g(\epsilon)$, псевдолегированного и легированного $a\text{-Si:H}$. Для определения $g(\epsilon)$ был применен метод фототоков, ограниченных пространственным зарядом (фото-ТОПЗ). Фототок в зависимости от напряжения представлен на рис. 3: видны участки степенной зависимости $I \sim V^m$, характерной для ТОПЗ, и участки насыщения фототока мишеней. Блокирующие слои у всех трех рассматриваемых мишеней были одинаковыми: $n^+a\text{-Si:H}$, полученный методом псевдолегирования, имеющий $\Delta E = 0.40$ эВ и $p\text{-As}_2\text{Se}_3$. Что касается i -слоев, то они отличались по величинам ΔE и, соответственно, по величинам N_D и $(\mu\tau)_p$: i -слои мишеней и образцы-свидетели для измерений этих параметров изготавливались в одном процессе.

Для каждой точки участка степенной зависимости вольт-амперной характеристики (рис. 3) можно использовать известные выражения [8]:

$$g(\epsilon_F^*) = \frac{\kappa}{ed^2kT} \frac{V}{m-1}, \quad (1)$$

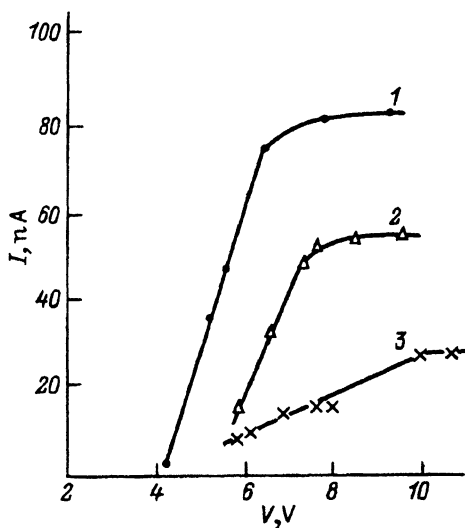


Рис. 3. Фототок мишени в зависимости от напряжения. Мишени освещали белым светом 0.5 лк. Толщина *i*-слоя 0.5 мкм. Энергии активации электропроводности *i*-слоя мишени, ΔE , эВ: 1 — 0.9, 2 — 1.1, 3 — 0.65.

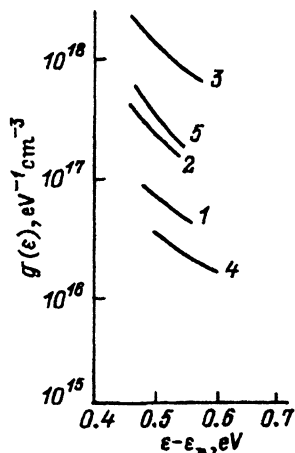


Рис. 4. Плотность состояний в щели подвижности. Псевдолегированный *a*-Si:H. Обозначения 1–3 соответствуют рис. 3. Данные [7]: 4 — нелегированный *a*-Si:H, 5 — *a*-Si:H, легированный фосфором.

$$\varepsilon_F^* - \varepsilon_v = kT \left[\ln \left(\frac{e\mu_v N_v}{d} \right) + \ln \left(\frac{I}{V} \right) \right], \quad (2)$$

где ε_F^* — квазиуровень Ферми, κ — диэлектрическая постоянная *a*-Si:H, ε_v — край валентной зоны, μ_v и N_v — подвижность дырок и эффективное число состояний вблизи ε_v ($\mu_v N_v = 10^{21} \text{ см}^{-1} / \text{В} \cdot \text{с}$), d — толщина *i*-слоя, V — приложенное напряжение, I — фототок. Отсюда строили функцию $g(\varepsilon)$.

На рис. 4 представлена плотность локализованных состояний для псевдолегированных образцов по данным настоящей работы и легированных фосфором образцов [7]. Видно, что при сдвигах уровня Ферми в сторону зоны проводимости изменения плотности состояний происходят в половине щели, примыкающей к валентной зоне, т.е. именно там, где находится «rool» дефектов — оборванных связей [7]. Во-вторых, изменения плотности состояний как для легированных, так и для псевдолегированных образцов состоят в ее росте, который однозначно связан с ростом концентрации оборванных связей (рис. 2). Таким образом, увеличение степени асимметрии функции плотности состояний приводит к сдвигам уровня Ферми от центра щели в сторону зоны проводимости.

Следует отметить, что сдвиги ε_F , по-видимому, нельзя интерпретировать просто как статистические. Действительно, увеличение концентрации фотоиндуцированных дефектов (оборванных связей в нейтральном состоянии, D^0) приводит к сдвигам уровня Ферми в противоположную сторону — к $E_g/2$ (эффект Стаблера–Вронского) [8]. Исходя из этого, сдвиги ε_F в сторону зоны проводимости при псевдолегирова-

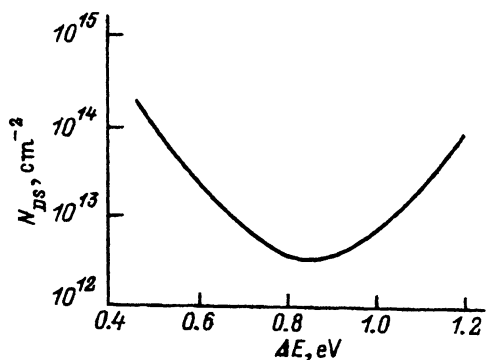


Рис. 5. Плотность дефектов на поверхности пленок псевдолегированного α -Si:H в зависимости от энергии активации электропроводности по данным [10].

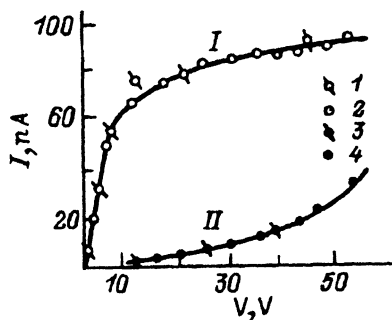


Рис. 6. Фототок (I) и темновой ток (II) мишени видикона в зависимости от приложенного напряжения. Толщина i -слоя 0.5 мкм. Мишени освещены белым светом 0.5 лк. 1, 3 — данные настоящей работы, 2, 4 — данные [11].

нии можно понять, если предположить, что образующиеся дефекты находятся в состоянии D^- (отрицательно заряженная оборванная связь), как при легировании донорными примесями.

Ранее такое предположение высказывалось в [5]. В его пользу свидетельствуют результаты проведенных недавно исследований фото-ЭПР нелегированного α -Si:H [9].

Обратимся снова к рис. 3 и рассмотрим области насыщения фототока мишеней. Начало области насыщения соответствует условию

$$(\mu\tau)_p V \gg d^2. \quad (3)$$

Сопоставляя данные, представленные на рис. 2 и 3, можно видеть, что область насыщения действительно начинается тем позже, чем больше материал i -слоя мишени отличается от собственного. Следует отметить, что при этом уменьшается величина фототока насыщения, которая, казалось бы, должна зависеть только от числа дырок в i -слое, созданных при поглощении света.

По-видимому, часть дырок «теряется» из-за их захвата на границах раздела структуры мишени, причем этот эффект зависит от концентрации дефектов на поверхности i -слоя, N_{DS} . Действительно, как видно из рис. 5, концентрация дефектов на поверхности пленки псевдолегированного α -Si:H возрастает по мере отступления ϵ_F от $E_g/2$ [10]. Здесь рассматривается ϵ_F , определяемый так же, как и ранее.

На рис. 6 представлены фототок и темновой ток двух мишеней, изготовленных традиционным методом с использованием легирования [11] и методом псевдолегирования (с оптимизированным i -слоем). Видно, что приведенные характеристики не зависят от способа изготовления мишени. В то же время подчеркнем еще раз, что псевдолегирование исключает работу с токсичным и взрывоопасными газами, не требует проведения процесса изготовления структуры прибора в многомерной установке, исключает диффузию примесей и тем самым повышает

надежность работы прибора. Контроль свойств пленок $a\text{-Si:H}$ исключительно за счет электрических воздействий на условия ВЧ разряда сравнительно просто осуществим и позволяет рассчитывать на повышенную стабильность результатов. Особенно следует подчеркнуть простоту изготовления собственного $a\text{-Si:H}$, поскольку прецизионное легирование бором требует, очевидно, значительно больших усилий. Подчеркнем также, что метод псевдолегирования $a\text{-Si:H}$ должен быть полезен особенно при создании i -слоев не только мишеней видикона, но и других электронных приборов на основе этого материала.

Авторы благодарны М.М. Мездрогинной и Н.Б. Захаровой за участие в работе.

Список литературы

- [1] T. Shimizu. Jpn. J. Appl. Phys., **25**, L353 (1982).
- [2] Informacni list. Tesla-Vakuola Technila — koncernovy podnik (Praga, Typ. VIDICON 33 Q) v. 26.
- [3] S3833 Technical Information. Sony Corporation. Pickup Tube Division, Image Device. Group Type: 1/2 inch B/W tube.
- [4] У. Спир, П. Ле Комбер. *Физика гидрогенизированного аморфного кремния* (М., Мир, 1987), вып. 1, с. 85.
- [5] О.А. Голикова. ФТП, **25**, 1517 (1991).
- [6] R.A. Streef. Phys. Rev. Lett., **49**, 1187 (1982).
- [7] K. Pierz, W. Fuhs, H. Mell. Phil. Mag. B, **63**, 123 (1991).
- [8] О.А. Голикова, Р.Г. Икрамов, М.М. Казанин. ФТП, **26**, 71 (1992).
- [9] G. Schumm. *Abstracts of the ICAS 15* (Cambridge, UK, 6–10 September, 1993), p. 2.
- [10] О.А. Голикова, Э.П. Домашевская, Х.Ю. Мавлянов, В.А. Терехов, С.Н. Тростянский. ФТП, **27**, 1468 (1993).
- [11] D. Jamadzaki. Terebigaku gikho (Japan), **11**, 73 (1989).

Редактор В.В. Чалдышев