

Влияние легирования азотом на электрофизические свойства и эрбиевую электролюминесценцию пленок $a\text{-Si:H(Er)}$

© О.И. Коньков, Е.И. Теруков, Л.С. Границына

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

(Получена 6 февраля 2001 г. Принята к печати 7 февраля 2001 г.)

Проведено исследование влияния легирования азотом на электрические и электролюминесцентные характеристики пленок аморфного гидрированного кремния, легированного эрбием. При этом параметры материала, характеристики структур на его основе и эффективность электролюминесценции эрбия ($\lambda = 1.54$ мкм) определяются превышением уровня легирования азотом над фоновым значением, определяемым концентрацией Er. Показано, что при уменьшении фоновой концентрации и сохранении легирования азотом на уровне $\sim 10^{21}$ см⁻³ возможно получение эффективно люминесцирующих структур. Предложен возможный механизм, объясняющий такой эффект на основе двух форм встраивания атомов азота в структуру $a\text{-Si:H}$, легированного Er: с образованием комплекса Er-N и с образованием заряженной дефектной пары $N_4^+-Si_3^-$, при этом эффективность электролюминесценции определяется количеством таких пар.

Введение

Интенсивное исследование фото- и электролюминесценции эрбия в аморфном гидрированном кремнии $a\text{-Si:H}$ в последнее время вызвано тем, что длина волны люминесценции эрбия $\lambda = 1.54$ мкм попадает в минимум поглощения оптического кварцевого волокна, слабым температурным гашением люминесценции, а также простотой введения эрбия при магнетронном распылении [1–5].

В работе [6] в результате анализа вольт-амперных характеристик электролюминесцентных структур Al/ $a\text{-Si:H(Er)}/c\text{-Si}$ сделано предположение, что увеличению эффективности электролюминесценции эрбия должно способствовать регулирование концентрации D-центров (оборванных связей кремния) и положения уровня Ферми путем легирования в n -тип, чтобы D-центры были заполнены электронами уже в равновесных условиях.

Известно, что как положение уровня Ферми, так и концентрация оборванных связей в $a\text{-Si:H}$ изменяются при легировании и в значительной степени определяются степенью легирования. При этом в качестве легирующей примеси обычно используется фосфор, хотя применяется также мышьяк, азот, кислород и др. (см., например, [7]).

В качестве легирующей примеси нами выбран азот по следующим соображениям.

1) Азот наряду с кислородом и углеродом относится к так называемым "неконтролируемым" примесям; некоторое количество таких примесей всегда присутствует в аморфном кремнии и влияет на его оптоэлектронные свойства и приборные характеристики [8]. При этом, даже применяя совершенные методы откачки, содержание азота в пленке $a\text{-Si:H}$ не удается понизить до уровня ниже $5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, а при отсутствии специальных мер (типа применения реактора с горячими стенками) содержание азота в получаемой пленке может возрасти более чем на 2 порядка [9].

2) Азот, так же как фосфор, выступает в аморфном кремнии как донор, увеличивая темновую проводимость и понижая ее энергию активации, хотя эффективность легирования азотом гораздо ниже, чем фосфором [10,11].

В данной работе мы исследовали влияние легирования азотом на электрические характеристики пленок аморфного гидрированного кремния, легированного эрбием, и электролюминесценцию структур на его основе.

Методика эксперимента

Пленки аморфного гидрированного кремния, легированного эрбием и азотом, $a\text{-Si:H(Er,N)}$, изготавливались методом магнетронного распыления металлического эрбия в силансодержащей атмосфере (метод MASD) [12]. В данном исследовании параметры технологического процесса были следующими: исходная газовая смесь — 12.5%SiH₄+37.5%H₂+50%Ar, величина магнитного поля 80 мТл, анодное напряжение 600 В, плотность мощности разряда 0.2 Вт/см², суммарное давление газовой смеси $4 \cdot 10^{-3}$ Торр. Для легирования эрбием использовался металлический эрбий чистотой 99.99 в виде фольги. Для легирования азотом состав исходной газовой смеси менялся путем добавления смеси состава 1%N₂+99%Ar, подаваемой по отдельной магистрали. Пленки толщиной 0.3–0.6 мкм наносились на подложки из кристаллического кремния n -типа проводимости для изготовления электролюминесцентных структур Al/ $a\text{-Si:H(Er,N)}/c\text{-Si}$ и определения состава, на подложки из полированного кварца для измерения проводимости и коэффициента поглощения. Al-контакты создавались термическим испарением. Измерения проводимости осуществлялись в планарной геометрии при фиксированном напряжении 10 В. Фотопроводимость измерялась при освещении кварцевой лампой через систему фильтров для выделения света с длиной волны $\lambda = 630$ нм, поток фотонов составлял 10^{15} см⁻² · с⁻¹. Оптическая ширина запрещенной зоны E_g определялась экстраполяцией

экспериментальной кривой зависимости коэффициента поглощения α от энергии фотонов $\hbar\omega$ до пересечения с осью абсцисс в соответствии с зависимостью $(\alpha\hbar\omega)^{1/2} = B(\hbar\omega - E_g)$. Сразу следует отметить, что величина E_g составляла порядка 1.7–1.8 эВ и слабо изменялась при легировании азотом в исследуемом диапазоне концентраций. Концентрации эрбия, кислорода и азота в пленке определялись методами резерфордского обратного рассеяния и ядерных реакций с дейтронами $^{16}\text{O}^{17}\text{O}$ и $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$. Содержание эрбия в пленке определялось из спектров резерфордского обратного рассеяния и составляло для двух исследованных случаев $(2-4) \cdot 10^{20}$ и $6 \cdot 10^{20} - 1.3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Концентрационный профиль эрбия по толщине пленки $a\text{-Si:H}$ был примерно постоянным и не выходил за указанные пределы. Содержание кислорода и азота определялось из спектров продуктов ядерных реакций.

Электролюминесценция (ЭЛ) наблюдалась при комнатной температуре на просвет через подложку кристаллического кремния. Излучение анализировалось двойным решеточным спектрометром с охлаждаемым германиевым фотоприемником. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись в импульсном режиме с частотой 47 Гц. Полярность приложенного напряжения — минус на электроде к аморфному кремнию — соответствовала той, при которой наблюдался сигнал ЭЛ эрбия.

Результаты

На рис. 1 представлены зависимости содержания азота в пленке $a\text{-Si:H(Er,N)}$, как содержащей, так и не содержащей эрбий, от уровня газофазного легирования r . Уровень газофазного легирования определялся как отношение молярных концентраций азота и силана в используемой газовой смеси: $r = [\text{N}_2]/[\text{SiH}_4]$. Пока-

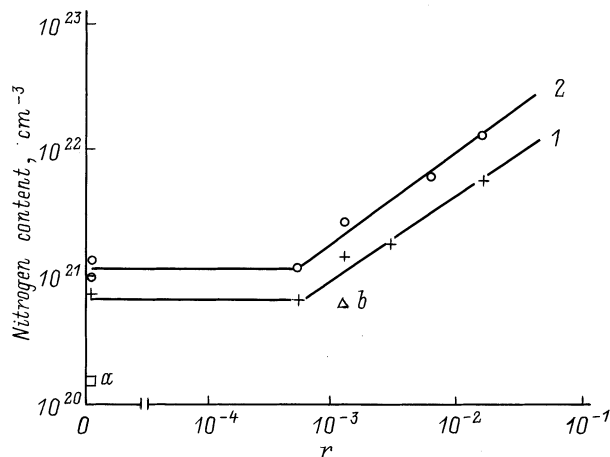


Рис. 1. Зависимость концентрации азота в пленке $a\text{-Si:H(Er,N)}$ от уровня газофазного легирования r для концентраций Er, см^{-3} : 1 — $(2-4) \cdot 10^{20}$, 2 — $(6 \cdot 10^{20} - 1.3 \cdot 10^{21})$. a — точка для пленки без Er и азота, b — точка для пленки без Er, легированной азотом.

заны значение концентрации азота для чистой пленки без эрбия и специально не легированной азотом — $1.3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (точка a) и значение, определенное для пленки $a\text{-Si:H}$ без эрбия, но легированной азотом с $r = 1.3 \cdot 10^{-3} - 7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (точка b). Из рисунка видны следующие особенности.

1) Фоновый уровень содержания азота в пленке без эрбия и без введения дополнительного количества азота достаточно большой, $\sim 1.3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, что согласуется с известным из литературы для методик получения $a\text{-Si:H}$ без использования специальных средств [9].

2) Введение эрбия резко повышает фоновый уровень содержания азота до $(7-9) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ для концентраций эрбия $(2-4) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и до $9 \cdot 10^{20} - 1.4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ для концентраций эрбия $6 \cdot 10^{20} - 1.3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. При этом до значений $r \lesssim 10^{-3}$ не наблюдается превышения содержания азота в пленке над фоновым. Резкое увеличение содержания азота в пленке $a\text{-Si:H}$ при введении эрбия сопровождается также резким увеличением содержания кислорода — от $(1-2) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ в пленке без эрбия до $6 \cdot 10^{21} - 1.2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ в пленке с эрбием, причем независимо от r . Такое поведение кислорода, а по нашему мнению и азота, связано с тем, что эрбий ведет себя как геттер, связывая на себя примеси. На геттерные свойства эрбия в кристаллическом и аморфном кремнии указывается в [13,14]. Очевидно, что особенно сильно геттерные свойства эрбия будут проявляться при его распылении в условиях постоянного натекания воздуха, т.е. в тех условиях, при которых происходит получение пленки $a\text{-Si:H(Er)}$ в используемом нами методе MASD.

3) Содержание азота в пленке пропорционально уровню газофазного легирования для $r \gtrsim 10^{-3}$. При этом эффективность газофазного легирования A , определяемая как отношение $[\text{N}]/[\text{Si}]$ в пленке к $[\text{N}_2]/[\text{SiH}_4]$ в газе, т.е. $A = ([\text{N}]/[\text{Si}])/([\text{N}_2]/[\text{SiH}_4])$, составляет ~ 0.06 в предположении, что содержание Si в пленке $a\text{-Si:H}$ составляет $4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Полученное значение для A находится в согласии со значением 0.1, полученным авторами [10] при легировании аморфного кремния азотом в методе высокочастотного разложения силана.

На рис. 2 представлены зависимости темновой проводимости σ_d от уровня газофазного легирования r для концентраций эрбия в пленке $(2-4) \cdot 10^{20}$ и $6 \cdot 10^{20} - 1.3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. При $r \lesssim 10^{-3}$ величина темновой проводимости почти не зависит от r и составляет $(2-4) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. При больших значениях r наблюдается резкое уменьшение проводимости до значений порядка $3 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Для всех исследованных образцов температурная зависимость темновой проводимости подчиняется активационному закону. При этом поведение энергии активации темновой проводимости E_a коррелирует с поведением σ_d , так что для $r \lesssim 10^{-3}$ E_a примерно постоянна, $E_a = 0.48 - 0.50 \text{ эВ}$ независимо от концентрации эрбия, а для больших значений r увеличивается до значений 0.7–0.8 эВ. Поскольку E_g не зависит от r , изменение σ_d определяется, скорее всего, именно изменением E_a .

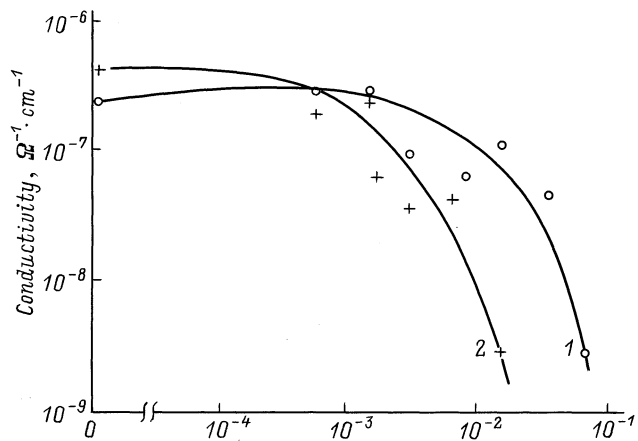


Рис. 2. Зависимость темновой проводимости пленок $a\text{-Si:H(Er,N)}$ от уровня газозафазного легирования r для концентраций Er, см^{-3} : 1 — $(2-4) \cdot 10^{20}$, 2 — $(6 \cdot 10^{20} - 1.3 \cdot 10^{21})$.

Аналогичное поведение σ_d и E_a при больших концентрациях азота (более 10^{21} см^{-3}) наблюдалось в работах [10,11,15,16] и может быть связано с изменением схемы встраивания азота в структуру $a\text{-Si:H}$ при больших его концентрациях.

Независимость σ_d и E_a от состава газовой фазы для $r \lesssim 10^{-3}$ вполне естественно объясняется постоянством концентрации азота в пленке аморфного кремния для этого диапазона составов газовой фазы, как это следует из рис. 1. Для сравнения нами были проведены измерения темновой проводимости σ_d и энергии активации E_a для пленок аморфного кремния без эрбия, которые дали следующие результаты: для пленки $a\text{-Si:H}$ без эрбия и без легирования азотом — $\sigma_d = 3 \cdot 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $E_a = 0.8 \text{ эВ}$; для пленки $a\text{-Si:H}$ без эрбия, легированной азотом на уровне $r = 1.4 \cdot 10^{-3}$ (концентрация азота в пленке $\sim 8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$) — $\sigma_d = 8 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $E_a = 0.68 \text{ эВ}$.

На рис. 3 представлены зависимости фоточувствительности, определяемой как отношение фотопроводимости к темновой проводимости, от r для двух исследованных концентраций эрбия. Поведение фоточувствительности очень схоже с поведением темновой проводимости, именно — фоточувствительность практически не зависит от степени газозафазного легирования при $r \lesssim 10^{-3}$ и возрастает при больших r . Обращает на себя внимание только существование минимума на кривой при $r = (7-9) \cdot 10^{-3}$ для концентрации эрбия $(2-4) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. На аналогичное поведение фоточувствительности при легировании $a\text{-Si:H}$ азотом указано в [17].

На рис. 4 представлены ВАХ некоторых структур $\text{Al}/a\text{-Si:H(Er,N)}/c\text{-Si}$ с концентрацией эрбия в слое аморфного кремния $6 \cdot 10^{20} - 1.3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ и разным уровнем газозафазного легирования азотом r . Измерения выполнены при комнатной температуре. Из рассмотрения кривых можно сделать следующие заключения.

Для $r \gtrsim 2 \cdot 10^{-3}$ ВАХ структур отличаются малыми значениями токов и относительной пологостью кривых во всем исследуемом диапазоне изменения напряжения. Для меньших r токи возрастают. Кроме того, наблюдаются участки резкого нарастания тока I с напряжением V , которые могут быть аппроксимированы степенными зависимостями вида $I \propto V^n$, где показатель степени n превышает 3. При этом для структуры со слоем аморфного кремния, выращенном при $r = 1.3 \cdot 10^{-3}$, существует участок ВАХ с $n \approx 7$.

В соответствии с результатами [6] резкое увеличение крутизны ВАХ является индикатором существования ЭЛ эрбия в структуре $\text{Al}/a\text{-Si:H(Er)}/c\text{-Si}$. Действительно, исследованная нами структура с $r = 1.3 \cdot 10^{-3}$, что соответствует концентрации азота в пленке $\sim 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, является излучающей, спектр ЭЛ приведен на рис. 5 (кривая 1). Спектр получен при приложении к структуре напряжения до 50 В (ток через структуру $\sim 40 \text{ мА}$), при этом наблюдается "эрбиевая" ($\lambda \approx 1.54 \text{ мкм}$) и "де-

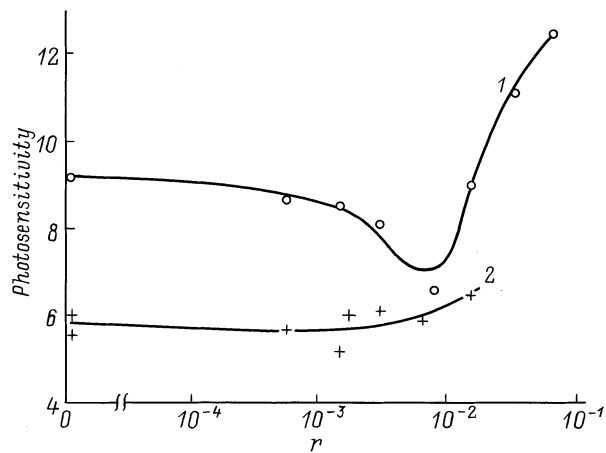


Рис. 3. Зависимость фоточувствительности пленок $a\text{-Si:H(Er,N)}$ от уровня газозафазного легирования r для концентраций Er, см^{-3} : 1 — $(2-4) \cdot 10^{20}$, 2 — $(6 \cdot 10^{20} - 1.3 \cdot 10^{21})$.

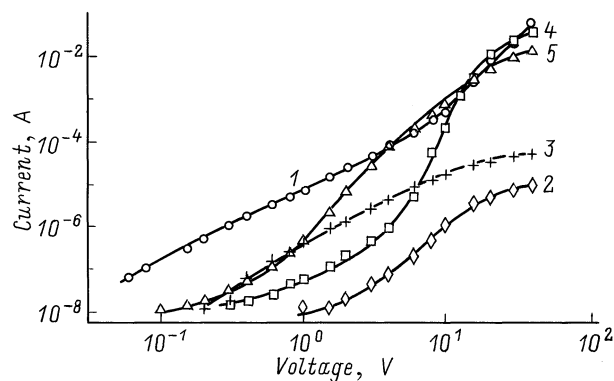


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики структур $\text{Al}/a\text{-Si:H(Er,N)}/c\text{-Si}$ для уровня газозафазного легирования азотом r : 1 — 0, 2 — $5.8 \cdot 10^{-3}$, 3 — $3.1 \cdot 10^{-3}$, 4 — $1.3 \cdot 10^{-3}$, 5 — $6.6 \cdot 10^{-4}$. Концентрация эрбия $6 \cdot 10^{20} - 1.3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$.

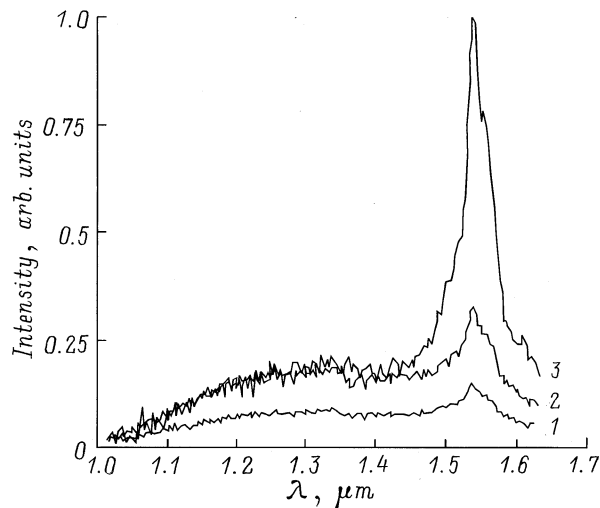


Рис. 5. Спектры электролюминесценции структур Al/a-Si:H(Er,N)/c-Si для концентраций Er в слое аморфного кремния, см^{-3} : 1 — $(6 \cdot 10^{20} - 1.3 \cdot 10^{21})$, 2 — $(2-4) \cdot 10^{20}$, 3 — $(5 \cdot 10^{19} - 1 \cdot 10^{20})$. Концентрация азота $(1-2) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$.

фектная” ($\lambda \approx 1.3 \text{ мкм}$) полосы люминесценции [1,12]. Для исследованных структур с той же концентрацией эрбия $6 \cdot 10^{20} - 1.3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, но другими концентрациями азота, в спектре ЭЛ наблюдалась только широкая полоса ”дефектной” люминесценции без явных признаков люминесценции эрбия. На том же рисунке представлен спектр ЭЛ структуры, содержащей слой аморфного кремния с концентрацией азота $1.4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, т.е. почти как в предыдущем случае, но с меньшей концентрацией эрбия — $(2-4) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Наблюдается увеличение люминесценции эрбия более чем в 2 раза. Условия измерения ЭЛ полностью аналогичны.

Обсуждение результатов

Следует отметить, что концентрация азота в пленке a-Si:H(Er,N) на уровне $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ — это некоторая особая точка. При превышении этой концентрации независимо от способа ее создания (фоновый ли это уровень концентрации, определяемый натеканием газа и геттерными свойствами эрбия, или специально созданный введением в газовую смесь дополнительного потока азота), скорее всего, изменяется способ вхождения атомов азота в структуру аморфного кремния, изменяется сама структура a-Si:H, и происходит переход к аморфному нитриду кремния a-Si:N:H [10,18,19]. Такой переход сопровождается уменьшением темновой проводимости, увеличением ее энергии активации, уменьшением фотопроводности, что наблюдается в нашем исследовании (см. рис. 1–3) и в работах других авторов [10,11,15–17]. При этом эффективность электролюминесценции эрбия уменьшается настолько, что нам не удалось обнаружить сигнал ЭЛ ни в одной из полученных и исследованных

структур с концентрацией азота в слое a-Si:H(Er,N) более $2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$.

Проведенные исследования показали, что нам не удалось понизить энергию активации темновой проводимости ниже значений 0.48–0.50 эВ независимо от концентрации эрбия. Как следует из сравнения рис. 1 и 2, это определяется большой фоновой концентрацией азота в пленке, $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$: сдвиг уровня Ферми блокируется до тех пор, пока концентрация специально введенного азота не превысит это фоновое значение. С другой стороны, при концентрации азота выше $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ E_a увеличивается, что противоречит нашим требованиям уменьшения энергии активации для получения структуры с эффективной электролюминесценцией. Можно сделать вывод, что значение $E_a \approx 0.48-0.50 \text{ эВ}$ — это предельное минимальное значение, которое может быть достигнуто при легировании аморфного кремния азотом в присутствии эрбия, причем достигается оно при концентрации введенного в пленку азота на уровне $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Такой вывод полностью подтверждается и литературными данными, из которых следует, что при легировании a-Si:H азотом минимальное значение E_a составляет: 0.51 эВ [11], 0.5 эВ при концентрации азота $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ [10], 0.65 эВ при концентрации азота $\sim 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ [17].

Уменьшение концентрации азота в пленке a-Si:H до значений $\lesssim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ при отсутствии других примесей (т.е. без эрбия в нашем исследовании) приводит к зависимости темновой проводимости, энергии активации и прочих параметров, характерной для легирования в n-тип, т.е. аналогично легированию фосфором, но с меньшей эффективностью [10,11,17]. Полученные нами результаты также согласуются с этим положением. Для пленки a-Si:H без эрбия и с концентрацией азота $\sim 1.3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ $\sigma_d = 3 \cdot 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $E_a = 0.8 \text{ эВ}$: для пленки a-Si:H без эрбия, легированной азотом в концентрации $\sim 8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $\sigma_d = 8 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $E_a = 0.68 \text{ эВ}$.

Аналогичные эффекты наблюдаются и при уменьшении фоновой концентрации азота в пленке аморфного кремния, содержащего эрбий. При величине фоновой концентрации азота $\lesssim 10^{21} \text{ см}^{-3}$, что достигается для пленок a-Si:H с концентрацией эрбия $(2-4) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, обнаруживается максимум на зависимости σ_d от r (рис. 2, кривая 1) и минимум на зависимости фоточувствительности от r (рис. 3, кривая 1) [10,11,15–17]. Кроме того, для концентраций азота в пленке $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ при $r \approx 10^{-3}$, что соответствует минимальному значению энергии активации $E_a = 0.48 \text{ эВ}$, мы наблюдаем ряд особенностей.

1) Резкий излом на ВАХ структуры, полученной при $r = 1.3 \cdot 10^{-3}$ (рис. 4, кривая 4), соответствующий в терминологии токов ограниченных пространственных зарядом ”полному заполнению ловушек” и являющийся характерным для структуры, где наблюдается ЭЛ [6].

2) Появляется сигнал ЭЛ эрбия. На рис. 5 представлены спектры ЭЛ структур, для которых аморфный кремний изготавливался с концентрациями эрбия

$(2-4) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (кривая 2) и $6 \cdot 10^{20} - 1.3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ (кривая 1) и суммарной концентрацией азота $\sim 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, что соответствует избыточным над фоновой концентрациям азота $1.6 \cdot 10^{21}$ и $1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Из рисунка видно, что большей избыточной концентрации азота соответствует и большая интенсивность сигнала ЭЛ эрбия при $\lambda = 1.54 \text{ мкм}$.

На основании всех вышеприведенных фактов можно сделать предположение, что эффективность ЭЛ эрбия в исследованных структурах прямо определяется величиной концентрации азота, избыточной над фоновой. Мы предлагаем следующий механизм, объясняющий это явление.

Азот встраивается в структуру аморфного гидрированного кремния, содержащего эрбий, в двух формах.

Первая форма — это фоновый азот, который захватывается атомом (или кластером) эрбия во время напыления пленки за счет эффекта геттерирования, о котором уже упоминалось. Такой азот в комплексе с эрбием формирует, аналогично комплексу эрбий–кислород (вероятнее всего, образуются комплексы Er-O-N), донорные состояния в запрещенной зоне аморфного кремния и одновременно с ними состояния оборванных связей — D -центров. D -центры являются акцепторами и могут находиться в двух зарядовых состояниях D^0 и D^- . В работе [5] сделано предположение, а в [6] расчетом на основе экспериментальных данных по измерениям ВАХ показано, что концентрации таких донорных и акцепторных состояний равны. Кроме того, как следует из рис. 1, концентрации эрбия и фонового азота в пленке $a\text{-Si:H(Er,N)}$ коррелируют и близки друг к другу, что подтверждает вероятность образования комплекса Er-N .

Уровень заряженной оборванной связи D^- лежит на $(0.9 \pm 0.1) \text{ эВ}$ ниже дна зоны проводимости, эффективная корреляционная энергия положительна; уровень нейтральной оборванной связи D^0 лежит на $(1.0 \pm 0.1) \text{ эВ}$ ниже дна зоны проводимости [7]. Механизм возбуждения ЭЛ эрбия при такой зонной структуре подробно описан в [1,5].

Вторая форма встраивания азота в структуру $a\text{-Si:H(Er,N)}$ касается избыточного азота, концентрация которого определяется превышением над фоновым значением. Такой азот не образует комплекса с эрбием и применительно к нему, по нашему мнению, справедлив механизм встраивания, предложенный для аморфного кремния без эрбия [17,20–22] и заключающийся в следующем. Атомы азота в матрице $a\text{-Si:H}$ находятся в форме N_4^+ — положительно заряженные 4-координированные атомы азота N_4^+ образуют донорные состояния и дают вклад в возрастание темновой проводимости, сдвиг уровня Ферми и т.п. В то же время из условия электронейтральности следует, что N_4^+ формирует Si_3^- — отрицательно заряженный 3-координированный атом кремния. Связка атомов $\text{N}_4^+ - \text{Si}_3^-$ образует то, что называется заряженной дефектной парой или, в терминологии [23], — близкой парой. Примечательная особенность такого механизма встраивания азота —

существование отрицательно заряженных оборванных связей кремния Si_3^- , количество которых в точности определяется количеством атомов азота, а в нашем случае определяется количеством азота, избыточного над фоновым уровнем. Заряженный дефект Si_3^- , очевидно, также может рассматриваться как участвующий в ЭЛ эрбия по механизму, предложенному в [1,5].

Полученные нами результаты говорят о том, что величина ”эрбиевой” ЭЛ определяется именно величиной избыточной концентрации азота, т.е. азота, встраивающегося в структуру $a\text{-Si:H}$ по второму предложенному нами механизму и не образующего комплекса с эрбием, а значит, именно концентрацией кремниевых оборванных связей Si_3^- , находящихся в конфигурации заряженной дефектной пары $\text{N}_4^+ - \text{Si}_3^-$. Не исключен вариант, что избыточный азот просто способствует увеличению степени возбуждения атомов эрбия, как предполагается в [24].

Проверка нашего предположения должна заключаться в следующем: при прочих равных условиях уменьшение фоновой концентрации азота должно приводить к увеличению интенсивности ”эрбиевой” ЭЛ. Так как эрбий выступает в качестве геттера для азота и определяет его фоновую концентрацию, единственно возможный способ уменьшения азотного фона для используемого нами метода получения $a\text{-Si:H}$ — уменьшение концентрации эрбия.

На рис. 5 (кривая 3) представлен спектр ЭЛ структуры на основе $a\text{-Si:H(Er,N)}$ со следующими значениями концентраций примесей: $\text{Er} - 5 \cdot 10^{19} - 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, что соответственно определяет фоновое значение концентрации азота на уровне $(1 - 6) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; суммарная концентрация азота — $(1 - 2) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, она соответствует упомянутой оптимальной точке. Из рисунка видно, что наблюдается ярко выраженный сигнал ЭЛ эрбия при $\lambda = 1.54 \text{ мкм}$ (спектр 3), превышающий по амплитуде спектры 1 и 2 для больших концентраций фонового азота. В то же время, согласно [14], при уменьшении концентрации Er от $6 \cdot 10^{20}$ до $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что соответствует изменению концентрации Er в нашем эксперименте, интенсивность фотолюминесценции эрбия падает почти на порядок.

Такой эксперимент подтверждает наши предположения о механизме вхождения азота в структуру $a\text{-Si:H(Er,N)}$ и о важной роли легирования азотом для увеличения интенсивности ЭЛ эрбия в аморфном кремнии. Не исключено, что к аналогичным эффектам приведет и легирование $a\text{-Si:H(Er)}$ другими примесями, кроме азота, например фосфором.

Заключение

В работе проведено исследование влияния легирования азотом на электрические и люминесцентные характеристики пленок аморфного гидрированного кремния, легированного эрбием. Показано, что при больших концентрациях введенного азота, $\gtrsim 10^{21} \text{ см}^{-3}$, величина тем-

новой проводимости уменьшается до $\sim 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, энергия активации возрастает до 0.7–0.8 эВ и не наблюдается сигнала ЭЛ эрбия. При малых концентрациях введенного азота ($\lesssim 10^{21} \text{ см}^{-3}$), азот ведет себя как донор и возможно изменение характеристик материала — увеличение σ_d до $\sim 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, уменьшение E_a до значений 0.48–0.50 эВ. При этом параметры материала, характеристики структур на его основе и эффективность ЭЛ эрбия определяются превышением уровня легирования азотом над фоновым значением, определяемым концентрацией Er.

Показано, что при уменьшении фоновой концентрации и сохранении уровня легирования азотом на уровне $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ возможно получение эффективно люминесцирующих структур. Предложен возможный механизм, объясняющий такой эффект на основе двух форм встраивания атомов азота в структуру $\alpha\text{-Si:H}$, легированного Er: с образованием комплекса Er–N и с образованием заряженной дефектной пары $\text{N}_4^+ \text{--Si}_3^-$. При этом эффективность ЭЛ определяется количеством таких пар.

Авторы благодарят В.М. Лебедева, М.М. Казанина и П.Е. Пака за проведение некоторых измерений.

Часть работы выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 01-02-17825).

Список литературы

- [1] M.S. Bresler, O.B. Gusev, V.Kh. Kudoyarova, A.N. Kuznetsov, P.E. Pak, E.I. Terukov, I.N. Yassievich, B.P. Zaharchenya, W. Fuhs, A. Sturm. *Appl. Phys. Lett.*, **67** (24), 3599 (1995).
- [2] J.H. Shin, R. Serna, G.N. van den Hoven, A. Polman, W.G.J.M. van Stark, A.M. Vredenburg. *Appl. Phys. Lett.*, **68** (7), 997 (1996).
- [3] A.R. Zanatta, Z.A. Nunes, Z.R. Tessler. *Appl. Phys. Lett.*, **70** (4), 511 (1997).
- [4] М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, П.Е. Пак, Е.И. Теруков, К.Д. Цендин, И.Н. Яссиевич. *ФТП*, **33** (6) 671 (1999).
- [5] О.Б. Гусев, М.С. Бреслер, Б.П. Захарченя, А.Н. Кузнецов, П.Е. Пак, Е.И. Теруков, К.Д. Цендин, И.Н. Яссиевич. *ФТТ*, **41** (2), 210 (1999).
- [6] П.А. Иванов, О.И. Коньков, Е.И. Теруков. *ФТП*, **34** (5), 617 (2000).
- [7] А. Меден, М. Шо. *Физика и применение аморфных полупроводников*, пер. с англ. под ред. С.А. Костылева (М., Мир, 1991).
- [8] W. Beyer, H. Overhof. *Semiconductors and Semimetals* (Academic, Orlando, 1984) v. 21, part C.
- [9] A. Morimoto, M. Matsumoto, M. Kumeda, T. Shimizu. *Japan. J. Appl. Phys.*, **29**, L1747 (1990).
- [10] A. Morimoto, M. Matsumoto, M. Yoshita, M. Kumeda, T. Shimizu. *Appl. Phys. Lett.*, **59** (17), 2130 (1991).
- [11] J.-H. Zhou, K. Yamaguchi, Y. Yamamoto, T. Shimizu. *J. Appl. Phys.*, **74** (8), 5086 (1993).
- [12] М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, Б.П. Захарченя, В.Х. Кудоярова, А.Н. Кузнецов, Е.И. Теруков, В. Фус, И.Н. Яссиевич. *ФТТ*, **38** (4), 1189 (1996).
- [13] A. Polman, G.N. van den Hoven, J.S. Custer, J.H. Shin, R. Serna, P.F.A. Alkemade. *J. Appl. Phys.*, **77** (3), 1256 (1995).

- [14] В.Х. Кудоярова, А.Н. Кузнецов, Е.И. Теруков, О.Б. Гусев, О.Б. Кудрявцев, Б.Я. Бер, Г.М. Гусинский, В. Фус, Г. Вейзер, Х. Кюне. *ФТП*, **32** (11), 1384 (1998).
- [15] T. Noguchi, S. Usui, A. Savada, Y. Kanoh, M. Kikuchi. *Japan. J. Appl. Phys.*, **21**, L485 (1982).
- [16] M. Hiramatsu, T. Kamimura, M. Nakajima, H. Ito. *Japan. J. Appl. Phys.*, **30**, L7 (1991).
- [17] A. Matsuda, K. Itoh, K. Matsuda, Y. Yonezawa, M. Kumeda, T. Shimizu. *J. Appl. Phys.*, **81** (10), 6729 (1997).
- [18] А.А. Айвазов, Б.Г. Будагян. *ФТП*, **25** (10), 1201 (1991).
- [19] M.J. Williams, S.S. He, S.M. Cho, G. Lucovsky. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **12** (4), 1072 (1992).
- [20] M. Kumeda, H. Yokomichi, T. Shimizu. *Japan. J. Appl. Phys.*, **23**, L502 (1984).
- [21] T. Shimizu, H. Kidoh, A. Morimoto, M. Kumeda. *Japan. J. Appl. Phys.*, **28**, L586 (1989).
- [22] M. Kumeda, M. Yoshita, A. Morimoto, T. Shimizu. *Japan. J. Appl. Phys.*, **29**, L1578 (1990).
- [23] J. Kocka, M. Vaneccek, F. Schauer. *J. Non-Cryst. Sol.*, **97–98**, 715 (1987).
- [24] L.N. Tessler, A.C. Iniguez. *J. Non-Cryst. Sol.*, **266–269**, 603 (2000).

Редактор Л.В. Шаронова

Nitrogen doping effect on electrophysical properties and erbium electroluminescence in $\alpha\text{-Si:H(Er)}$ films

O.I. Kon'kov, E.I. Terukov, L.S. Granitsina

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia