

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ И ПЛОТНОСТЬ СОСТОЯНИЙ АМОРФНОГО ГИДРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО БОРОМ

Голикова О. А., Бабаходжаев У. С., Дубро В. В.,
Икрамов Р. Г., Казанин М. М., Мездрогина М. М., Яфаев Р. Р.

Исследованы фото- и темновая проводимость $a\text{-Si} : \text{H}$, легированного ионной имплантацией и из газовой фазы, в зависимости от степени легирования, а также параметр Урбаха и дефектное поглощение полученных образцов. Показано, что при слабом легировании бором (для «собственных» образцов) $(\mu\tau)^{(n)}$, (p) мало зависят от способа легирования. Установлено, что параметр Урбаха и дефектное поглощение легированных образцов являются функциями положения уровня Ферми в щели подвижности.

Известно, что легирование аморфного гидрированного кремния ($a\text{-Si} : \text{H}$) приводит не только к сдвигам уровня Ферми ε_F , но и к трансформациям плотности локализованных состояний $g(\varepsilon)$ за счет сопутствующих введению примесей трансформаций структурной сетки [1]. С этой точки зрения, представляет интерес сравнение фотоэлектрических свойств и $g(\varepsilon)$ $a\text{-Si} : \text{H}$ при различных методах введения примесей, но при одинаковых положениях ε_F в E_g . В данной работе исследованы $a\text{-Si} : \text{H}\langle\text{B}\rangle$, причем В вводили как непосредственно при ВЧ разложении газовых смесей в триодной системе, так и методом ионной имплантации нелегированных пленок. Были исследованы темновая и фотопроводимость (σ_T и σ_ϕ), а также оптическое поглощение методом постоянного фототока.

При ВЧ разложении использованы смеси ($\text{SiH}_4 + \text{B}_2\text{H}_6 + \text{He}$). Ионную имплантацию проводили при следующих условиях эксперимента: дозы облучения $D = (10^{12} \div 10^{15}) \text{ см}^{-2}$, энергии 60 кэВ, $T = 300 \text{ К}$.

После имплантации образцы подвергали отжигу в вакууме при 200°C в течение 1 ч.

На рис. 1 представлены зависимости σ_T ($T = 300 \text{ К}$) и ее энергии активации ΔE от дозы облучения. Видно, что переход в p -тип происходит при $D > 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Действительно, исходные образцы n -типа, а введение В приводит к перекомпенсации: ΔE сначала возрастает, а затем падает, и соответственно изменяется σ_T (для $n\text{-}a\text{-Si} : \text{H}$ $\Delta E = |\varepsilon_c - \varepsilon_F|_{T=0}$, а для $p\text{-}a\text{-Si} : \text{H}$ $\Delta E = |\varepsilon_v - \varepsilon_F|_{T=0}$).

На рис. 2 приведены σ_T ($T = 300 \text{ К}$) и ΔE образцов, легированных из газовой фазы, в зависимости от величины отношения концентраций B_2H_6 и SiH_4 .

Образцы слабо легированного $a\text{-Si} : \text{H}$, для которых $\Delta E \simeq E_g/2$, в дальнейшем будем называть «собственными» [$E_g^{\text{отр}}(T=0) \simeq 2 \text{ эВ}$].

На рис. 1 и 2 представлена также σ_ϕ $a\text{-Si} : \text{H}$ в зависимости от степени легирования. Рассмотрим σ_ϕ образцов $a\text{-Si} : \text{H}\langle\text{B}\rangle$, легированных ионной имплантацией (1 и 2) и из газовой фазы (1а и 2а) (рис. 1, 2). Образцы выбраны так, что $\Delta E_1 \simeq \Delta E_{1a}$ и $\Delta E_2 \simeq \Delta E_{2a}$, причем 1 и 1а — собственные, а 2 и 2а — p -типа. Видно, что σ_ϕ при $T = 300 \text{ К}$ для собственных образцов близки друг к другу независимо от метода легирования. На основании результатов [2] и [3] пола-

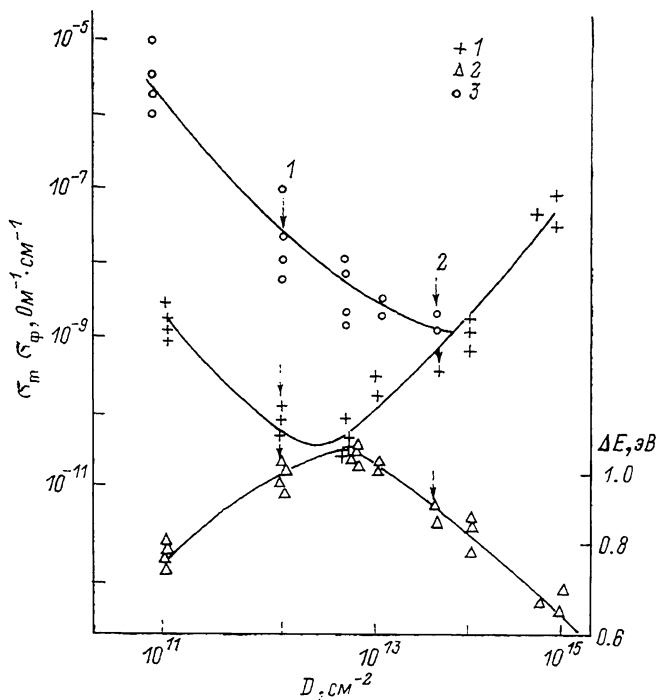


Рис. 1. σ_T , ΔE и σ_ϕ в зависимости от дозы имплантированного бора ($E=60$ кэВ): σ_T и σ_ϕ при $T=300$ К.

1 — σ_T , 2 — ΔE , 3 — σ_ϕ . Стрелками показаны параметры образцов 1 и 2.

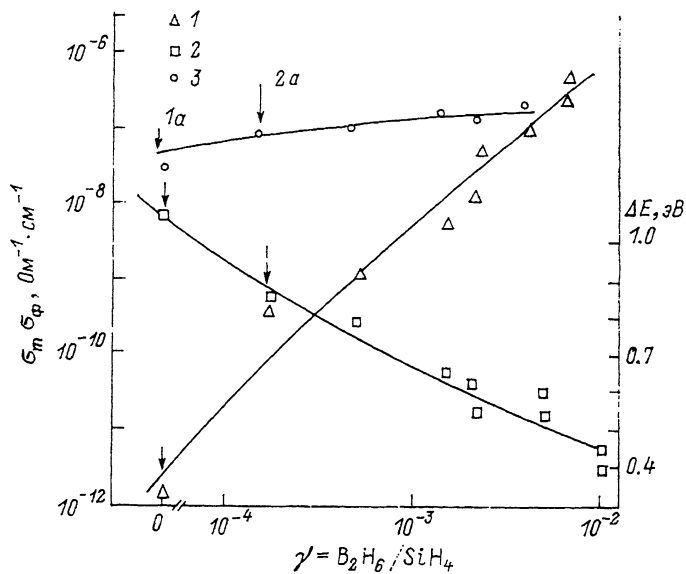


Рис. 2. σ_T (1), ΔE (2) и σ_ϕ (3) в зависимости от γ — отношения концентрации диборана и фосфина в газовой смеси (σ_T и σ_ϕ при $T=300$ К).

Стрелками показаны параметры образцов 1а и 2а.

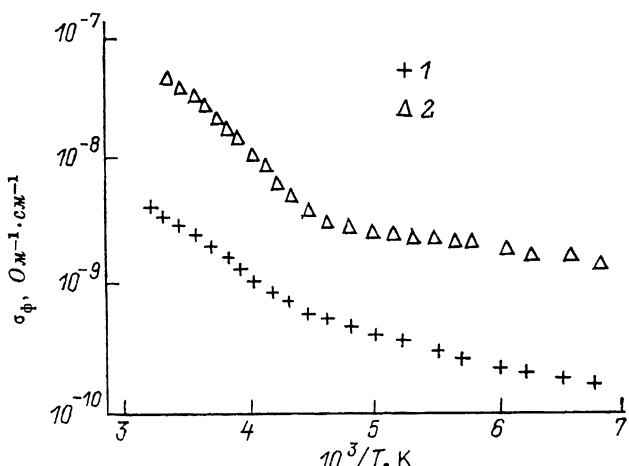


Рис. 3. Температурные зависимости σ_ϕ для образцов 2 и 2а: легированных ионной имплантацией (1) и из газовой фазы (2) ($\Delta E = \text{const}$).

гаем, что для таких образцов произведения подвижности на время жизни дырок и электронов равны. Тогда $(\mu\tau)^{(p)} = (\mu\tau)^{(n)} \approx 10^{-8} \text{ см}^2/\text{В}$, $T=300 \text{ К}$. Полученные величины совпадают с аналогичными величинами для нелегированных образцов при тех же ΔE (псевдолегированные образцы [1]).

Величины σ_ϕ образцов p -типа, полученных ионной имплантацией, значительно ниже, чем полученных из газовой фазы, как это видно из сравнения данных для образцов 2 и 2а (рис. 1, 2). Следует отметить, что при $D \geq 10^{14} \text{ см}^{-2}$ фотопроводимость при $T=300 \text{ К}$ наблюдать не удается, и величины σ_ϕ оцениваются $\leq 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Сравнение температурных зависимостей σ_ϕ при $T < 300 \text{ К}$ показывает, что для образцов p -типа, полученных из газовой фазы, рост σ_ϕ более резкий (рис. 3). Как известно, величина энергии активации σ_ϕ при $T > 230 \div 250 \text{ К}$ отождествляется с глубиной залегания дырочных ловушек [4]. Для образцов, легированных ионной имплантацией и из газовой фазы, она равна 0.15 и 0.25 эВ соответственно, причем последняя величина близка к наблюдаемой в [4] для $a\text{-Si} : \text{H}$, также легированного из газовой фазы.

На рис. 4 представлена характеристическая энергия Урбаха в зависимости от положения ϵ_F для $a\text{-Si} : \text{H} \langle \text{В} \rangle$, полученного разными методами, а также для псевдолегированного $a\text{-Si} : \text{H}$. Видно, что ΔE_U ионнолегированных образцов существенно ниже, чем ΔE_U образцов, легированных из газовой фазы. Если, как обычно, считать, что ΔE_U коррелирует с протяженностью хвоста плотности состояний v -зоны (дырочных ловушек), то можно говорить о согласии с данными о σ_ϕ , представленными на рис. 3. Действительно, энергия активации σ_ϕ , как и ΔE_U , для образца 2а выше, чем для образца 2.

Информация о концентрации N_D оборванных Si—Si-связей была получена на основании результатов исследования дефектного поглощения: $N_D \sim \int \frac{\Delta\alpha}{\nu} d\nu$, как в [8]. При переходе ϵ_F в половину E_g , примыкающую к ϵ_g , наблюдается рост $\Delta\alpha$ независимо от метода легирования (рис. 5), который объясняется увеличением плотности D^+ -центров [3]. Несколько более низкие величины для образцов, легированных из газовой фазы, по-видимому, можно считать следствием неучета уменьшения E_g при этом методе легирования. Уменьшение E_g для таких образцов следует из представленных на рис. 4 данных о ΔE_U , если принять во внимание корреляцию E_g и ΔE_U , установленную в [5]. На рис. 5

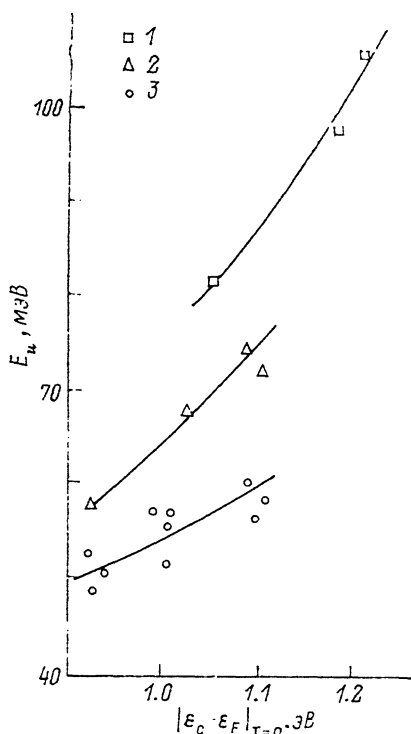


Рис. 4. Характеристическая энергия Урбаха ($T=300$ К) в зависимости от $|\epsilon_c - \epsilon_F|_{T=0}$.

1 — α -Si : H (B), приготовленный из газовой фазы; 2 — α -Si : H (B), приготовленный ионной имплантацией; 3 — псевдолегированный α -Si : H.

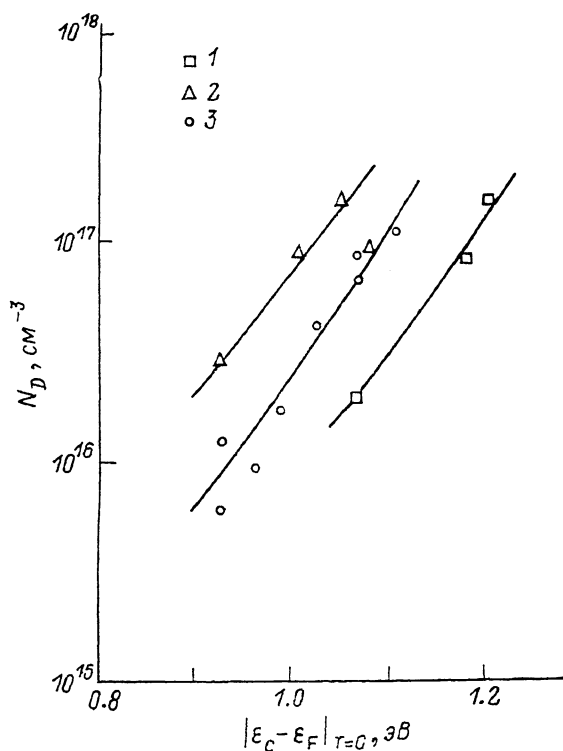


Рис. 5. $N_D \sim \int \frac{\Delta \alpha}{v} dv$ в зависимости от $|\epsilon_c - \epsilon_F|_{T=0}$.

Обозначения те же, что на рис. 4. N_D рассчитывалась так же, как в [3].

представлены также результаты, полученные ранее для псевдолегированных образцов α -Si : H [3]. Согласно [3], соответствующая данным о $\Delta \alpha$ минимальная концентрация оборванных связей для исследованных образцов составляет $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Таким образом, способ получения собственных образцов α -Si : H (слабое легирование бором из газовой фазы и ионной имплантацией или псевдолегированием) не влияет на величины $(\mu \tau)^{(n), (p)}$ ($T=300$ К), поскольку при изменении метода легирования отсутствуют существенные различия в плотности оборванных Si—Si-связей, а имеющиеся различия в $g(\epsilon)$ хвостов, как известно, оказывают влияние на $(\mu \tau)^{(n), (p)}$ только при достаточно низких температурах [для псевдолегированного α -Si : H хвосты наименьшие (рис. 4)].

При увеличении степени легирования и переходе к p -типу σ_ϕ ($T=300$ К) нонлегированного α -Si : H при $\epsilon_F = \text{const}$ ниже, чем легированного из газовой фазы. В настоящее время нельзя дать однозначный ответ на вопрос о причинах этого: влияние ли это «неотожженных» оборванных связей (рис. 5) или других дефектов, образующихся в результате высокой концентрации введенных атомов бора. Действительно, при $D=10^{18} \text{ см}^{-2}$, например, объемная концентрация бора составляет $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а электрически активна только 1/200-я ее часть [6]. Отметим, что при достаточно сильном легировании бором из газовой фазы, когда $\Delta E < 0.6$ эВ, σ_ϕ наблюдать тоже не удается. Ответу на поставленный выше вопрос должны способствовать результаты детальных исследований структурной сетки α -Si : H(B) при различных методах легирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Голикова О. А., Казанин М. М., Мездрогина М. М., Кудоярова В. Х., Сорокина К. Л., Бабаходжаев У. С. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 10. С. 1737—1740.
- [2] Голикова О. А., Бабаходжаев У. С., Казанин М. М., Мездрогина М. М. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 1. С. 102—105.
- [3] Голикова О. А., Бабаходжаев У. С., Казанин М. М., Мездрогина М. М. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 3. С. 443—445.
- [4] Казанский А. Г., Миличевич Е. П., Уразбаева Р. А. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 6. С. 1143—1145.
- [5] Gody G. D., Tiedje T., Abeles B., Brooks B., Goldstein Y. // Phys. Rev. Lett. 1981. V. 47. N 20. P. 1480—1484.
- [6] Le Comber P. G., Spear W. E. // J. Non-Cryst. Sol. 1980. V. 35-36. P. 327—339.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Получена 2.07.1991
Принята к печати 18.07.1991

