

СОСТОЯНИЕ ЛАЗЕРНО-ИМПЛАНТИРОВАННОГО КРЕМНИЯ
НА ГРАНИЦЕ Si—Al

Фистуль В. И., Павлов А. М., Леваднюк Э. Н., Михайлов В. И.

Приводятся спектры комбинационного рассеяния поверхности кремния, легированного примесью алюминия. Проведено сравнение спектров КР лазерно-имплантированного кремния со спектрами КР диффузионно-легированного кремния. Показано, что спектры КР лазерно-имплантированного кремния уширены и сдвинуты на величину $\sim 1 \text{ см}^{-1}$ в сравнении со спектрами КР кремния после диффузионного легирования, при этом концентрация алюминия при лазерной имплантации на порядок превышает концентрацию алюминия, полученную при термическом отжиге. При плотностях мощности лазерного излучения выше пороговой спектр КР сдвигается на 22 см^{-1} и значительно уширяется, поверхность кремния толщиной $\sim 1 \text{ мкм}$ становится аморфной. Концентрация алюминия в аморфной пленке более чем на порядок превышает максимальную предельную растворимость в монокристаллическом кремнии.

В [1, 2] опубликованы результаты формирования контактов Si<Al> и их электрические фотоэлектрические свойства, а также методика лазерной имплантации поверхности полупроводника. В этом методе облучение лазерным светом границы раздела Si—Al осуществляется сквозь кремниевую пластину, когда энергия кванта света $h\nu$ совпадает с шириной запрещенной зоны полупроводника E_g . В результате максимальное высвобождение энергии на единицу объема происходит в пограничном слое границы металл—полупроводник.

В настоящей работе исследовано состояние поверхности кремния на границе Si—Al. Для лазерной имплантации мы использовали ОКГ на алюминате иттрия, активированного неодимом в режиме свободной генерации. Длина волны излучения 1.08 мкм . Механическим модулятором вырезались импульсы длительностью $\tau = 50 \text{ мкс}$, состоящие из пиков длительностью $\sim 1 \text{ мкс}$. Средняя плотность мощности за время τ в режиме имплантации составляла $2.3 \times 10^{10} \text{ Вт/м}^2$. Для данного τ пороговая плотность мощности, при которой происходит разрушение поверхности полупроводника, составляла $4 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$. С целью импульсного нагрева структуры металл—полупроводник частота импульсов свободной генерации не превышала 2 Гц . Образец непрерывно сканировался, и через каждые 7 мкм производился импульс, а излучение фокусировалось на площадку диаметром 400 мкм . Улучшение однородности лазерного излучения по сечению достигалось использованием в резонаторе полиэтиленовой пленки, снижающей его добротность, при этом потери световой энергии составляли $30\text{—}40\%$.

Образцы представляли собой пластины кремния марки КЭФ-4.5 толщиной 0.5 мм , на которые напылялась пленка алюминия толщиной 1.3 мкм . Затем пластина разрезалась пополам. Одна из половин была подвергнута термическому отжигу в течение 30 мин при температуре 400°C . Результаты по термическому отжигу приводятся для сравнения с результатами по лазерной имплантации. Другая половина пластины, предназначенная для лазерной имплантации, готовилась следующим образом. На нее наносились капли химически стойкого лака (ХСЛ) диаметром $2\text{—}3 \text{ мм}$. После высыхания лака с остальной поверхности пластины удалялась пленка алюминия в водном растворе HF. Затем пластина помещалась на одну минуту в полирующий травитель: $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH} =$

$=1.5 : 30 : 2$. Эта операция была необходима для того, чтобы после имплантации и удаления алюминия была видна область исследования по контуру травления. После травления с областей, покрытых алюминием, механически удалялся ХСЛ. Образцы кремния располагались на сапфировой подложке, которая в свою очередь помещалась на вакуумной смазке на хладопроводе. Через отверстие в хладопроводе и сапфировую подложку излучение фокусировалось на кремний. Охлаждение толстой пластины кремния необходимо было для увеличения ее прозрачности. При температуре 100 К ширина запрещенной зоны кремния составляет $E_g = 1.164$ эВ [3], а энергия кванта света $h\nu = 1.148$ эВ, т. е. $h\nu < E_g$. Уже при небольшом нагреве границы раздела структуры кремний—алюминий вследствие поглощения металлом лазерного излучения энергия кванта света становится больше E_g , в то время как для основной массы полупроводника $h\nu < E_g$. Кроме того, при низкой температуре локальные тепловые неоднородности в объеме полупроводника, вызванные неравномерным по сечению лазерным излучением, быстро рассасываются вследствие металлической теплопроводности охлажденного полупроводника. В результате лазерной имплантации концентрация примеси алюминия в кремний получается на порядок выше, чем при обычном термическом отжиге, указанном выше, при той же глубине легирования. Поверхностная концентрация примеси при лазерной имплантации составляла величину, сравнимую с максимальной раство-

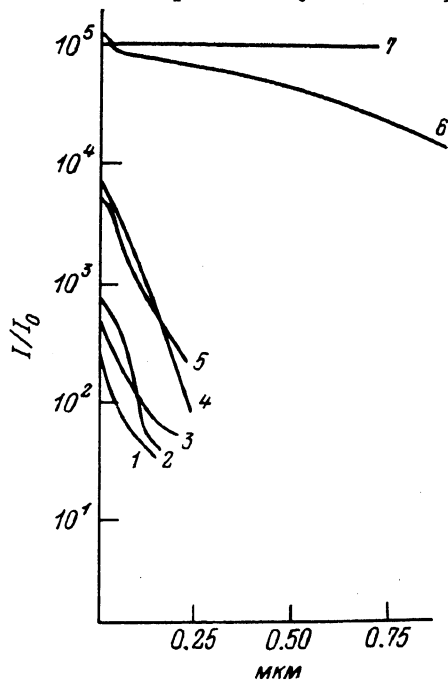


Рис. 1. Концентрационные профили алюминия в пластинках кремния в отн. ед.

1 — эталон, 2, 3 — термическая диффузия, 4, 5 — лазерная имплантация при плотности мощности излучения $2.3 \cdot 10^{10}$ Вт/м², 6 — лазерное воздействие при плотности мощности $4 \cdot 10^{10}$ Вт/м², 7 — кремний.

римостью алюминия в кремний, которая имеет значение $2 \cdot 10^{19}$ см⁻³ [4]. На рис. 1 приведены типичные концентрационные профили алюминия в кремнии, полученные методом вторичной масс-спектрологии на приборе IMS-3f. Кривая 1 соответствует эталону. Эталон приготавливался путем удаления алюминия в водном растворе плавиковой кислоты с нелегированной пластины кремния с последующей протиркой спиртовым тампоном. Профили 2, 3 получены в пластинках, подвергнутых термическому отжигу. Затем следуют профили 4, 5, соответствующие пластинам, подвергнутым лазерной имплантации. Пологий и соответственно глубокий профиль 6 получен при лазерном облучении с разрушающей плотностью мощности $4 \cdot 10^{10}$ Вт/м². Горизонтальная линия 7 соответствует относительному распределению кремния, к которому привязывались все приведенные профили концентрации примеси алюминия.

На рис. 2 приводится фотография области разрушения, полученная в расправном электронном микроскопе HITACHI S-800. На ней показано изображение поверхности кремния, подвергнутого лазерному облучению, при котором не было принято никаких мер по выравниванию лазерного излучения по сечению светового пучка. Облучению подвергалась тонкая пластина кремния при комнатной температуре. На фотографии видны характерные кратеры от горячих точек лазерного излучения и лепестки приваренной эвтектики. Выше было указано, что при плотности мощности $4 \cdot 10^{10}$ Вт/м² происходит разрушение поверхности кремния. Выравнивание интенсивности излучения по сечению изменяет характер разрушения. На рис. 3 видна рваная пенообразная пленка равномерной толщины, что говорит о планарности воздействия. Можно было предполагать, что обнаруженная пленка представляет собой аморфное образо-

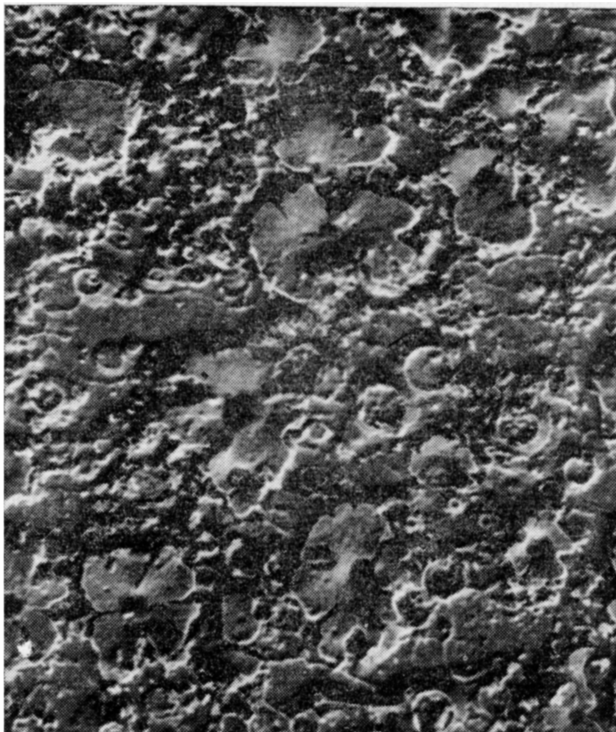


Рис. 2. Электронно-микроскопическая картина поверхности тонкой (100 мкм) пластины кремния после лазерного воздействия при комнатной температуре.



Рис. 3. Электронно-микроскопическая картина поверхности толстой (500 мкм) пластины кремния после лазерного воздействия, проводимого при температуре 100 °С.

вании. С целью проверки этого предположения мы исследовали спектры комбинационного рассеяния света от этой пленки. Исследование проводилось на установке «Моле». Спектры КР возбуждались аргоновым лазером с длиной волны излучения 514.5 нм. Исследовались пластины после лазерной имплантации и для сравнения после термического отжига. Те и другие сопоставлялись со спектрами КР для аморфного кремния, опубликованными в литературе [5]. Перед измерением КР поверхностный алюминий удалялся с образцов в водном растворе плавиковой кислоты. Спектры KPSi, термически обработанного (рис. 4, спектр 2) и эталонного (спектр 1), практически не отличались друг от друга. Монокристаллический кремний характеризуется полосой КР 522.3 см^{-1} с полушириной 4.8 см^{-1} . Сходство спектров КР от обоих образцов, вероятно, связано с тем, что при термической диффузии происходит лишь слабое легирование кремния алюминием, что видно из рис. 1. Лазерная имплантация кремния примесью алюминия при плотности мощности излучения $2.3 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$ в течение трех проходов одной и той же области образца ведет к уширению полосы КР кремния $\Gamma=5.1 \text{ см}^{-1}$ и сдвигу этой полосы в низкочастотную область $\nu=521.6 \text{ см}^{-1}$ (рис. 4, спектр 3). Полученные результаты свидетельствуют о том, что лазерная обработка ведет к более сильному легированию кремния алюминием. При использовании лазерного излучения с плотностью мощности, близкой к $4 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$, в низкочастотной части полосы кремния появляется слабое плечо (рис. 4, спектр 4). При увеличении мощности до разрушающей ($4 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$) при одном проходе лазерного луча спектр КР имеет частоту $\nu=510 \text{ см}^{-1}$ и ширину $\Gamma=28 \text{ см}^{-1}$. При двукратном проходе лазерного луча по-

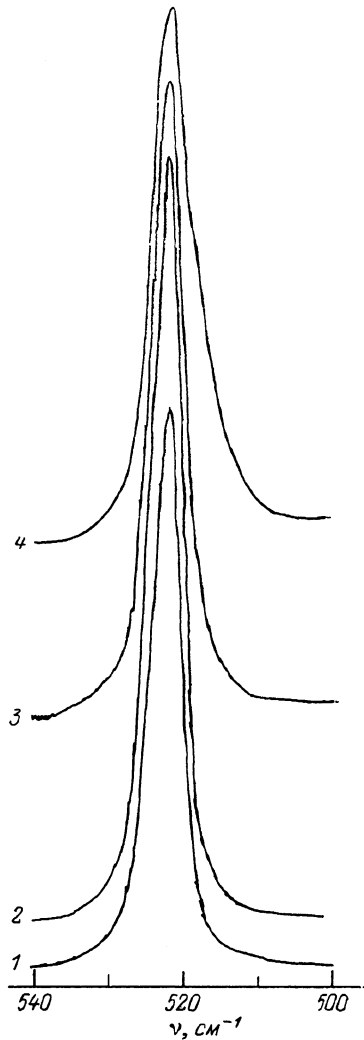


Рис. 4. Спектры КР кремния.

1 — эталон, 2 — термическая диффузия, 3 — лазерная имплантация, 4 — лазерное воздействие при плотности мощности, близкой к $4 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$.

лоса КР уширяется и сдвигается в низкочастотную область ($\nu=500 \text{ см}^{-1}$ и $\Gamma=31 \text{ см}^{-1}$). Так как приведенные в литературе [5] характеристики спектра КР аморфного кремния близки к тем, что мы наблюдаем, можно утверждать, что поверхности исследованных образцов аморфны.

Авторы благодарят М. К. Киселеву за снятие концентрационных профилей и Т. И. Грому за получение электронно-микроскопических снимков.

Список литературы

- [1] Фистуль В. И., Павлов А. М. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 5. С. 854—858.
- [2] Фистуль В. И., Павлов А. М. // ФТП. Т. 20. В. 12. С. 2140—2144.
- [3] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 2. М., 1984. 455 с.
- [4] Trumbore F. A. // Bell Syst. Techn. J. 1960. V. 39. P. 205.
- [5] Iqbal Z., Vepřek S. // Sol. St. Phys. 1982. V. 25. P. 377—392.