УДК 621.315.5 *Краткое сообщение*

Лазерный отжиг легированных аморфных плёнок кремния, полученных высокочастотным распылением

Г.А. Мустафаев[1], Н.В. Черкесова[1], А.Г. Мустафаев[2]
[1]ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»
360004, Россия, Нальчик, ул. Чернышевского, 173
[2]ГАОУ ВО «Дагестанский государственный университет народного хозяйства»
367008, Россия, Махачкала, ул. Джамалутдина Атаева, 5
arslan_mustafaev@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.714

Аннотация: Исследовано влияние импульсного лазерного отжига на структурные и электрофизические свойства легированных мышьяком аморфных плёнок кремния (толщина 50-200 нм), полученных высокочастотным ионным распылением. Показано, что при плотности энергии 1,4 Дж/см² на поверхности формируется окисленный аморфный слой толщиной до 75 нм, под которым обнаруживается кристаллический слой с концентрацией мышьяка превышающей предел растворимости. Установлено, что диффузия мышьяка в монокристаллическую подложку происходит только при плавлении последней (порог >1,0 Дж/см²) и усиливается с уменьшением толщины аморфной плёнки и с ростом числа импульсов. При этом испарение материала приводит к потерям до 20% *As* и образованию кратеров глубиной до 100 нм, что связывается с выделением пузырьков *Ar*. Обнаружено, что минимальное поверхностное сопротивление (<10 Ом/□) достигается при трёх импульсах и толщине 50-100 нм, что соответствует максимальной электрической активации примеси. На основе лазерного отжига сформированы диодные структуры с плотностью тока насыщения $6{,}5\cdot10^{-10}$ А/см^2 и плотностью тока утечки $2{,}5\cdot10^{-8}$ А/см^2, что свидетельствует о перспективности метода для создания мелких p-n переходов.

Ключевые слова: лазерная обработка, аморфные пленки, концентрация примеси, толщина пленки, диффузия, подложка, плотность энергии, поверхностное сопротивление, легированный слой.

Мустафаев Гасан Абакарович – д.т.н., профессор кафедры электроники и цифровых информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет»
Черкесова Наталья Васильевна – к.ф.-м.н., доцент кафедры электроники и цифровых информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет»
Мустафаев Арслан Гасанович – д.т.н., профессор кафедры информационных технологий и информационной безопасности ГАОУ ВО «Дагестанский государственный университет народного хозяйства»

Short Communication

Laser annealing of doped amorphous silicon films obtained by high frequency sputtering

G.A. Mustafayev[1], N.V. Cherkesova[1], A.G. Mustafayev[2]
[1]Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia
[2]Dagestan State University of National Economy, Makhachkala, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.714

Abstract: The effect of pulsed laser annealing on the structural and electrical properties of arsenic-doped amorphous silicon films (50-200 nm thick) obtained by high frequency ion sputtering is studied. It is shown that at an energy density of 1,4 J/cm^2, an oxidized amorphous layer up to 75 nm thick forms on the surface, under which a crystalline layer with an *As* concentration exceeding the solubility limit, is detected. It is found that *As* diffusion into the single-crystal substrate occurs only upon

© Г.А. Мустафаев, Н.В. Черкесова, А.Г. Мустафаев, 2026

melting of the latter (threshold >1,0 J/cm²) and increases with decreasing the amorphous film thickness and increasing the number of pulses. Moreover, evaporation of the material leads to a loss of up to 20% *As* and the formation of craters up to 100 nm deep, which is associated with the release of *Ar* bubbles. It was found that the minimum surface resistance (<10 Ω/□) is achieved with three pulses and a thickness of 50-100 nm, corresponding to the maximum electrical activation of the impurity. Diode structures with a saturation current density of $6{,}5\cdot10^{-10}$ A/cm² and a leakage current density of $2{,}5\cdot10^{-8}$ A/cm^2 were formed using laser annealing, demonstrating the potential of this method for creating shallow p-n junctions.

Keywords: laser processing, amorphous films, impurity concentration, film thickness, diffusion, substrate, energy density, surface resistance, doped layer.

Gasan A. Mustafayev – Dr. Sc., Professor, Department of Electronics and Digital Information Technologies, Kabardino-Balkarian State University
Natalya V. Cherkesova – Ph. D., Associate Professor, Department of Electronics and Digital Information Technologies, Kabardino-Balkarian State University
Arslan G. Mustafayev – Dr. Sc., Professor, Department of Information Technologies and Information Security, Dagestan State University of National Economy, ORCID:0000-0003-3463-4303

Поступила в редакцию/received: 04.08.2026; после рецензирования/revised: 02.09.2026; принята/accepted: 07.09.2026.

1. Введение

Импульсное воздействие лазерного либо электронного излучения позволяет осуществлять эпитаксиальную рекристаллизацию аморфных пленок кремния на монокристаллических кремниевых подложках. Возможным применением этого эффекта является формирование $p-n$ переходов путем отжига аморфных пленок, содержащих легирующую примесь [1-4]. В работе исследован лазерный отжиг наноразмерных аморфных пленок кремния, сформированных с помощью высокочастотного (ВЧ) ионного распыления и легированных мышьяком.

2. Методика эксперимента

Эксперименты выполняли на монокристаллических пластинах кремния $p-$типа (удельное сопротивление 10 Ом·см) с ориентацией (100). После стандартной химической очистки поверхности от естественного оксида (травление в растворе $HF:H_2O=1:10$ в течение 1 минуты) на подложках с помощью ВЧ ионного распыления в плазме смеси $Ar-H_2-AsH_3$ (80 : 19 : 1) при давлении 1,2 Па и температуре подложек 190°С формировали аморфные плёнки Si толщиной от 50 до 200 нм. Скорость напыления составляла ~0,5 нм/с, контролировалась кварцевым резонатором и дополнительно уточнялась эллипсометрией ($\lambda=632{,}8$ нм) на тестовых образцах. Неоднородность толщины по пластине не превышала ±5%.

Отжиг проводили с использованием лазера с модуляцией добротности ($\lambda=694{,}3$ нм, длительность импульса 20 нс, частота повторения – одиночные импульсы). Энергия в импульсе регулировалась

набором нейтральных фильтров и измерялась калориметром ОР-38; погрешность установки плотности энергии составляла ±5%. Диаметр лазерного пятна на образце – 3 мм, облучение выполнялось в режиме сканирования с перекрытием пятен ~30% для обеспечения однородности обработки площади ~1 см^2. Все отжиги проводились на воздухе при нормальных условиях, а для изучения влияния газовой среды дополнительно выполнялись эксперименты в вакууме (остаточное давление ~10^{-3} Па).

После лазерного воздействия поверхностный окисленный слой удаляли травлением в 5%-ном растворе HF в течение 30 с, после чего образцы промывали в деионизованной воде.

Толщину оставшегося аморфного слоя и глубину кратеров определяли с помощью профилометра. Структуру поверхности и кристаллическое состояние анализировали методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов $^4He^+$ с энергией 2 МэВ в режиме случайного и канального спектров (каналирование вдоль оси <100>) [5, 6]. По канальным спектрам оценивали долю окисленный аморфный слой, наличие эпитаксиальной рекристаллизации и степень замещения атомов As в узлах кристаллической решётки, что служило мерой электрической активации примеси. Концентрации примесей As, Ar, H и O определяли из интегральных пиков РОР и спектров ядерных реакций (для водорода) с точностью ~10%. Поверхностное сопротивление измеряли четырёхзондовым методом с линейным расположением зондов (шаг 1 мм) при комнатной температуре; приведённые значения являются усреднением по 10 точкам на образце. Сопоставление данных РОР (полная концентрация As и доля замещённых атомов) с поверхностным сопротивлением позволяло оценить эффективность электрической активации при различных режимах облучения.

Для формирования диодных структур на части поверхности создавали маску из фоторезиста с окнами площадью 0,5 мм^2, затем проводили лазерный отжиг, после чего оставшийся аморфный материал служил изоляцией. Вольтамперные характеристики и вольт-фарадные характеристики измеряли с помощью измерителя иммитанса Е7-25 и источника-измерителя Keithley 2400 в тёмном экранированном боксе при 25°C. Параметры диодов (ток насыщения, фактор идеальности, встроенный потенциал) извлекали стандартными методами аппроксимации.

3. Результаты и обсуждение

Свойства пленок после лазерной обработки зависят от многих параметров: от плотности энергии, толщины пленки аморфного материала,

газовой среды при отжиге и количества импульсов. В работе исследовали пленки толщиной 100 нм. Перед отжигом пленки легировали концентрацией примесей: $5{,}8\cdot10^{21}$ см$^{-3}$ для As, $2{,}5\cdot10^{21}$ см$^{-3}$ для Ar и $7{,}5\cdot10^{21}$ см$^{-3}$ для H. По плотности и концентрации кислорода O пленки были идентичны объемному кремнию Si. После лазерной обработки на воздухе при плотности энергии 1,4 Дж/см^2 на поверхности образца появлялся слой с разупорядоченной кристаллической структурой, толщиной 75 нм. Состав этого слоя содержал As и был окислен. Аморфный слой как целое не претерпевает полной эпитаксиальной рекристаллизации, однако в приповерхностной области монокристаллической подложки формируется сильно легированный кристаллический слой Si с концентрацией As $2{,}5\cdot10^{21}$ см$^{-3}$, что превышает предел растворимости мышьяка в кремнии при 1200°C [7]. При этом исходный аморфный кремний остаётся аморфным. Вместе с тем, полная поверхностная концентрация мышьяка уменьшалась от исходного уровня $5{,}8\cdot10^{16}$ см$^{-2}$ до $4{,}7\cdot10^{16}$ см$^{-2}$. Потеря 20% As обусловлена испарением в процессе лазерной обработки и перераспределением вглубь [8], при которой действие одного импульса образует кратер глубиной 30 нм. Этот эффект можно объяснить образованием пузырьков Ar, прорывающихся через поверхность пленки и уносящих часть материала; это предположение подтверждается увеличением глубины кратера до 100 нм при проведении отжига в условиях вакуума. В случае выращивания аморфных пленок кремния в тлеющем разряде в отсутствие Ar подобный эффект образования кратеров не наблюдается.

Следует отметить, что при лазерной обработке на воздухе толщина слоя с разупорядоченной структурой соответствует толщине остающегося слоя аморфного кремния. Следовательно, аморфный кремний не кристаллизуется и есть основания полагать [9-11], что это обусловлено высокой концентрацией водорода. В целом имеет место лишь диффузия As в поверхностный слой монокристаллической подложки, а эпитаксиальная кристаллизация аморфного кремния отсутствует.

Если при фиксированной плотности энергии (1,4 Дж/см^2) увеличить толщину пленки аморфного кремния, то практически вся энергия поглощается в аморфном кремнии, потери материала из-за испарения возрастают, плавление поверхности монокристаллической подложки не происходит, и диффузия мышьяка в подложку при лазерной обработке отсутствует. Напротив, с уменьшением толщины пленки аморфного кремния доля поглощаемой подложкой энергии увеличивается, потери материала из-за испарения снижаются, а диффузия мышьяка в подложку усиливается. При фиксированной толщине пленки аморфного кремния увеличение плотности энергии ведет к аналогичному эффекту усиления

диффузии мышьяка в подложку. При этом необходимо учитывать различие пороговых уровней плотности энергии плавления – 0,6 Дж/см^2 для аморфного кремния и 1,0 Дж/см^2 для монокристаллического *Si*; следовательно, с учетом толщины пленки аморфного кремния, диффузия мышьяка в подложку может происходить только при плотности энергии больше 1,0 Дж/см^2 [12].

В случае облучения одного участка серией лазерных импульсов без промежуточного травления в плавиковой кислоте толщина поверхностного слоя с разупорядоченной структурой уменьшается. При этом толщина слоя с разупорядоченной структурой уменьшается до 30 нм (после удаления окисла травлением в плавиковой кислоте она уменьшается до 25 нм). При облучении серией из трех импульсов глубина кратера увеличивается до 100 нм. На рис. 1 показана зависимость глубины образующегося кратера от числа импульсов для разных (50, 100 и 200 нм) значений исходной толщины пленки аморфного *Si* при плотности энергии 1,4 Дж/см^2.

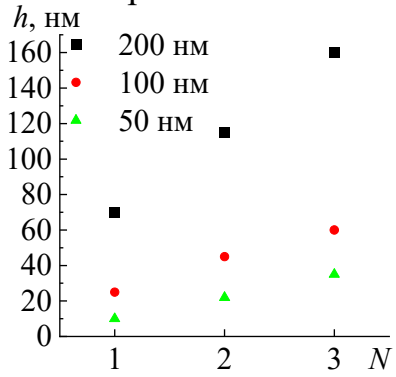

Рис. 1. Зависимость глубины образующегося кратера от числа импульсов для разных значений исходной толщины пленки аморфного *Si* при плотности энергии 1,4 Дж/см^2.

При этом остающаяся часть пленки аморфного кремния не кристаллизуется, возможно из-за большой остаточной концентрации водорода ($2{,}5\cdot10^{20}$ см$^{-3}$), которая, несмотря на частичную десорбцию при лазерном воздействии, остается достаточно высокой для подавления эпитаксиальной кристаллизации. На рис. 2 показана зависимость полной концентрации *As* и концентрации электрически активных атомов *As* от числа импульсов при плотности энергии 1,4 Дж/см^2 в пленке аморфного кремния.

На рис. 3 показана зависимость поверхностного сопротивления легированного слоя от исходной толщины пленки аморфного кремния при воздействии одного и трех импульсов с плотностью энергии 1,4 Дж/см^2, минимум поверхностного сопротивления соответствует максимуму электрической активации примеси, здесь также проявляется эффект снижения эффективности диффузии мышьяка в подложку из-за увеличения доли энергии, поглощаемой пленкой аморфного кремния и ослабления плавления поверхности монокристаллической подложки.

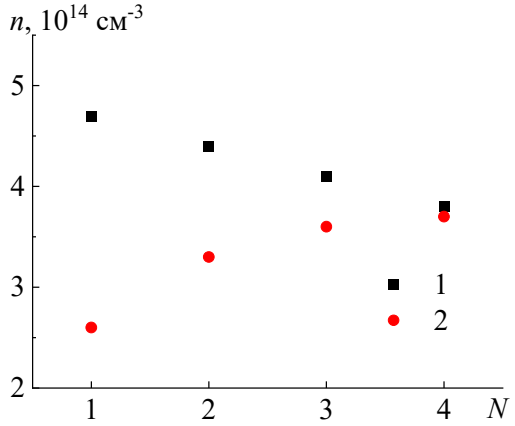

Рис. 2. Зависимость концентрации атомов мышьяка в плёнке аморфного кремния в зависимости от числа импульсов: (1) – полная концентрация, (2) – концентрация электрически активных атомов. Плотность энергии составляет 1,4 Дж/см^2.

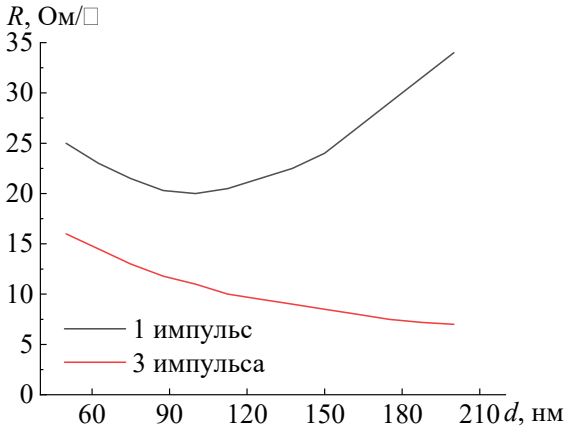

Рис. 3. Зависимость поверхностного сопротивления легированного слоя от исходной толщины пленки аморфного кремния при воздействии импульсов с плотностью энергии 1,4 Дж/см^2.

В целом изменение электрических свойств при увеличении числа импульсов хорошо коррелирует с ростом электрической активации *As* по данным измерений резерфордовского обратного рассеяния ионов. Наименьшие полученные значения поверхностного сопротивления (меньше 10 Ом/□) удовлетворяют требованиям, предъявляемым к эмиттерным слоям и омическим контактам в полупроводниковых приборах.

4. Заключение

Установлено, что при облучении одиночным импульсом (1,4 Дж/см^2) на воздухе аморфный кремний не кристаллизуется из-за высокой остаточной концентрации водорода, однако происходит диффузия мышьяка в поверхностный слой монокристаллической подложки. Глубина кратера и потери примеси зависят от толщины исходной плёнки и количества импульсов, причём в вакууме кратерообразование усиливается, что подтверждает роль аргона.

Показано, что эффективная электрическая активация мышьяка достигается при трёхкратном облучении плёнок толщиной 50-100 нм; при этом поверхностное сопротивление снижается до значений менее 10 Ом/□, что удовлетворяет требованиям для создания омических контактов и эмиттерных слоёв.

На основе лазерного отжига сформированы диодные структуры с использованием остаточного аморфного кремния в качестве изоляции. Параметры диодных структур соответствовали модели идеального диода с током насыщения $6{,}5 \cdot 10^{-10}$ А/см² и фактором идеальности $n = 1{,}45$ (при прямом смещении >0,4 В), что указывает на рекомбинационно-диффузионный механизм переноса. Плотность тока утечки при обратном смещении 1,0 В ($2{,}5 \cdot 10^{-8}$ А/см²) ниже, чем у обычных диффузионных переходов.

Таким образом, лазерный отжиг ВЧ распылённых аморфных плёнок кремния, легированных мышьяком, является эффективным методом формирования сверхлегированных слоёв и диодных структур с низким сопротивлением и малыми токами утечки.

Библиографический список:

1. **Fogarassy, E.** Pulsed laser annealing of RF sputtered amorphous Si-H films doped with arsenic / E. Fogarassy, R. Stuck, M. Toulemonde et al. // Journal of Applied Physics. – 1982. – V. 53. – I. 4. – P. 3261-3266. DOI: 10.1063/1.331029.
2. Laser and electron beam processing of materials / ed. by C.W. White, P.S. Peercy. – New York: Academic Press, 1980. – XVIII+769 p. DOI: 10.1016/B978-0-127-46850-1.X5001-4.
3. **Arduino, D.** Silicon and silicon carbide recrystallization by laser annealing: a review / D. Arduino, S. Stassi, C. Spano et al. // Materials (Basel). – 2023. – V. 16. – I. 24. – Art. № 7674. – 22 p. DOI: 10.3390/ma16247674.
4. **Huet, K.** Doping of semiconductor devices by laser thermal annealing / K. Huet, F. Mazzamuto, T. Tabata et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2017. – V. 62. – P. 92-102. DOI: 10.1016/j.mssp.2016.11.008.
5. **Komarov, F.F.** Influence of the laser pulse annealing of the silicon implanted with indium and arsenic ions on its optical and structural properties / F.F. Komarov, O.V. Mil'chanin, I.N. Parchomenko et al. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2024. – V. 97. – I. 3. – P. 745-752. DOI: 10.1007/s10891-024-02946-7.
6. **Scanlon, P.J.** Channeling and high-resolution backscattering studies of laser-annealed low-energy arsenic-implanted silicon / P.J. Scanlon, K.M. Barfoot, P. Skensved et al. // In: Ion Implantation: Equipment and Techniques; ed. by H. Ryssel, H. Glawischnig. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1983. – P. 549-553. DOI: 10.1007/978-3-642-69156-0_63.
7. **White, C.W.** Supersaturated substitutional alloys formed by ion implantation and pulsed laser annealing of group-III and group-V dopants in silicon / C.W. White, S.R. Wilson, B.R. Appleton, F.W. Young Jr. // Journal of Applied Physics. – 1980. – V. 51. – I. 1. – P. 738-749. DOI: 10.1063/1.327334.
8. **Tan, H.S.** Green function approach to the calculations of dopant redistribution in multi-pulse laser irradiation of silicon / H.S. Tan, C.K. Ong // Journal of Physics C: Solid State Physics. – 1985. – V. 18. – № 14. – P. 2799-2807. DOI: 10.1088/0022-3719/18/14/011.
9. **Kim, C.-D.** Excimer-laser annealing technology for hydrogenated amorphous-silicon devices / C.-D. Kim, R. Ishihara, M. Matsumura // Japanese Journal of Applied Physics. – 1995. – V. 34. – № 11R. – P. 5971-5976. DOI: 10.1143/JJAP.34.5971.
10. **Heise, H.** Hydrogen bonding in laser-crystallized poly-Si / H. Heise, N.H. Nickel // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2002. – V. 299-302. – Part 1. – P. 226-230. DOI: 10.1016/S0022-3093(01)00979-6.
11. **Wang, H.** Effect of hydrogen on surface texturing and crystallization of a-Si:H thin film irradiated by excimer laser / H. Wang, F. Lusquiños, Y.L. Yao // Applied Physics A. – 2012. – V. 107. – I. 2. – P. 307-320.

DOI: 10.1007/s00339-012-6843-4.
12. **Fair, R.B.** Modeling laser-induced diffusion of implanted arsenic in silicon / R.B. Fair // Journal of Applied Physics. – 1979. – V. 50. – I. 10. – P. 6552-6555. DOI: 10.1063/1.325716.

References:

1. Fogarassy E., Stuck R., Toulemonde M., Bruyere J.C., Siffert P. Pulsed laser annealing of RF sputtered amorphous Si-H films doped with arsenic, *Journal of Applied Physics*, 1982, vol. 53, issue 4, pp. 3261-3266. DOI: 10.1063/1.331029.
2. *Laser and electron beam processing of materials*, ed. by C.W. White, P.S. Peercy. New York, Academic Press, 1980, XVIII+769 p. DOI: 10.1016/B978-0-127-46850-1.X5001-4.
3. Arduino D., Stassi S., Spano C. et al. Silicon and silicon carbide recrystallization by laser annealing: a review, *Materials (Basel)*, 2023, vol. 16, issue 24, art. no. 7674. DOI: 10.3390/ma16247674.
4. Huet K., Mazzamuto F., Tabata T. et al. Doping of semiconductor devices by laser thermal annealing, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2017, vol. 62, pp. 92-102. DOI: 10.1016/j.mssp.2016.11.008.
5. Komarov F.F., Mil'chanin O.V., Parchomenko I.N. et al. Influence of the laser pulse annealing of the silicon implanted with indium and arsenic ions on its optical and structural properties, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2024, vol. 97, issue 3, pp. 745-752. DOI: 10.1007/s10891-024-02946-7.
6. Scanlon P.J., Barfoot K.M., Skensved P. et al. Channeling and high-resolution backscattering studies of laser-annealed low-energy arsenic-implanted silicon, *Ion Implantation: Equipment and Techniques*, ed. by H. Ryssel, H. Glawischnig. Berlin, Heidelberg, Springer, 1983, pp. 549-553. DOI: 10.1007/978-3-642-69156-0_63.
7. White C.W., Wilson S.R., Appleton B.R., Young F.W. Jr. Supersaturated substitutional alloys formed by ion implantation and pulsed laser annealing of group-III and group-V dopants in silicon, *Journal of Applied Physics*, 1980, vol. 51, issue 1, pp. 738-749. DOI: 10.1063/1.327334.
8. Tan H.S., Ong C.K. Green function approach to the calculations of dopant redistribution in multi-pulse laser irradiation of silicon, *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 1985, vol. 18, no. 14, pp. 2799-2807. DOI: 10.1088/0022-3719/18/14/011.
9. Kim C.-D., Ishihara R., Matsumura M. Excimer-laser annealing technology for hydrogenated amorphous-silicon devices, *Japanese Journal of Applied Physics*, 1995, vol. 34, no. 11R, pp. 5971-5976. DOI: 10.1143/JJAP.34.5971.
10. Heise H., Nickel N.H. Hydrogen bonding in laser-crystallized poly-Si, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2002, vol. 299-302, part 1, pp. 226-230. DOI: 10.1016/S0022-3093(01)00979-6.
11. Wang H., Lusquiños F., Yao Y.L. Effect of hydrogen on surface texturing and crystallization of a-Si:H thin film irradiated by excimer laser, *Applied Physics A*, 2012, vol. 107, issue 2, pp. 307-320. DOI: 10.1007/s00339-012-6843-4.
12. Fair R.B. Modeling laser-induced diffusion of implanted arsenic in silicon, *Journal of Applied Physics*, 1979, vol. 50, issue 10, pp. 6552-6555. DOI: 10.1063/1.325716.