

УДК 621.382

В. С. Осадчук, д. т. н., проф.; А. В. Осадчук, д. т. н., проф.; Р. В. Дуда**МИКРОЭЛЕКТРОННЫЙ СЕНСОР С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА МЕТОДОМ МОДУЛЯЦИИ ПРОВОДИМОСТИ В ТОЧЕЧНОМ КОНТАКТЕ**

В технологиях изготовления полупроводниковых приборов используют различные методы исследования их параметров, которые оценивают по изменению структурно-чувствительных электрических параметров – диффузионной длины пробега неравновесных носителей заряда L_D и времени их жизни τ [4]. Известные методики [1] определения этих параметров позволяют определить L_D и τ для объема полупроводников, поэтому важной задачей данной работы было изучить возможности определения τ с помощью преобразования напряжения в частоту. Последующий анализ и обработка частотного сигнала позволяет повысить точность определения τ . При этом рассматривали методику измерения времени жизни носителей заряда методом модуляции проводимости в точечном контакте.

Ключевые слова: время жизни, диффузионная длина, неравновесные носители заряда, модуляция, точечный контакт.

Введение

Измерение времени жизни носителей заряда методом модуляции проводимости в точечном контакте заключается в том, что через точечный контакт на поверхности образца, который служит эмиттером, проходит импульс тока прямоугольной формы, с помощью которого в объем образца инжектируются носители заряда. За счет рекомбинации после окончания импульса тока избыточная концентрация носителей заряда в объеме образца уменьшается [2].

Через некоторое время (время задержки) после окончания инжектирующего импульса через точечный контакт проходит следующий импульс тока, с помощью которого производят измерение. Напряжение на образце в момент прохождения измеряющего импульса зависит от концентрации носителей заряда, которые не успели рекомбинировать. Изменяя время задержки в пределах $0 - 3 \tau$, можно по зависимости напряжения на образце от времени задержки определить время жизни носителей заряда [4].

Анализ последних исследований и публикаций

Научно-технический прогресс невозможно представить без электроники, а особенно микроэлектроники. В современной микроэлектронике широко применяют полупроводниковые материалы и многослойные структуры, на основе которых изготавливают различные полупроводниковые приборы и микросхемы. Дальнейшее совершенствование технологии изготовления полупроводниковых материалов связано с повышением эффективности лабораторного и промышленного контроля качества. От этого зависят как размеры технологических потерь на различных этапах производства, так и материальные затраты на производственный контроль их качества. Оснащение промышленности высокоточными и производительными средствами измерения, разработка неразрушающих методов контроля непосредственно связаны с проблемой повышения качества производства полупроводниковых материалов и структур.

Работа большинства полупроводниковых приборов основана на неравновесной проводимости, то есть на инжекции, диффузии, дрейфе и рекомбинации неравновесных носителей тока. Значение и характер распределения неравновесных носителей заряда, а следовательно, и время их жизни изменяются в широких пределах в зависимости от условий

их генерации, типа примесных центров, их концентрации в объеме и на поверхности пластины. Исследование этих неоднородностей имеет важное значение для изучения различных физических процессов, а также для увеличения выхода годных полупроводниковых приборов и уменьшения разброса их параметров.

Время жизни неосновных носителей заряда является важным параметром, влияющим на параметры материала, которые, в свою очередь, влияют на характеристики полупроводниковых устройств, использующих свойства неосновных носителей заряда [3].

Наиболее эффективные методы измерения времени жизни неосновных носителей заряда:

1. *Стационарные методы*: метод измерения диффузионной длины, основанный на использовании подвижного светового зонда, а также метод измерения фотоэлектромagnetного эффекта и стационарной проводимости.

2. *Нестационарные методы*: импульсный метод затухания фотопроводимости, который используется при измерениях на пластинах и на слитках, а также методы с использованием $p-n$ переходов.

Зная нужное время жизни, можно выбрать определенную технологию изготовления того или иного изделия, например, легирования кремния золотом приводит к уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда, а при использовании гетеру время жизни, наоборот, увеличивается. Следует отметить, что часто важно измерять время жизни в готовом устройстве, а не в материале.

На рис. 1 представлена блок-схема классификации методов для определения времени жизни носителей заряда в полупроводниках [7].



Рис. 1. Блок-схема классификации методов для определения времени жизни носителей заряда в полупроводниках

Математическая модель

Обозначим максимальное напряжение на образце через $U(\infty)$, а напряжение в момент подачи импульса, с помощью которого происходит измерение, – $U(t)$. Разность этих напряжений – это функция времени задержки [3]:

$$\Delta U(t) = U(\infty) - U(t) = \frac{1}{2\pi\sigma_0} \int_{t_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2} - \frac{1}{2\pi\sigma_0} \int_{t_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2 \left[1 + \frac{\Delta\sigma(r,t)}{\sigma_0} \right]}. \quad (1)$$

Если избыточная концентрация носителей заряда низкая по сравнению с концентрацией

Наукові праці ВНТУ, 2013, № 4

основных носителей заряда, то выражение (1) примет вид:

$$\Delta U(t) = \frac{I}{2\pi\sigma_0^2} \left[\int_{r_0}^{\infty} e\mu_p(b+1)\Delta p(r,0) \frac{dr}{r^2} \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right). \quad (2)$$

Напряжение $\Delta U(t)$ [3] спадает во времени по экспоненциальному закону при условии, что время задержки не слишком малое, поскольку интеграл в квадратных скобках не зависит от t .

Изменяя время задержки импульса тока, с помощью которого происходит измерение, и фиксируя значение $U(\infty)$, можно найти время жизни носителей заряда по углу наклона прямой $\ln \Delta U(t)$ от функции времени задержки [3]:

$$\frac{1}{\tau_p} = -\frac{d}{dt} \ln U(t).$$

Учитывая поверхностную рекомбинацию, диффузию носителей заряда и влияние точечного контакта, получим [2]:

$$\mu_p \xi \gg s \text{ або } \frac{I}{2\pi r^2} \gg s. \quad (3)$$

Для образцов с малой скоростью поверхностной рекомбинации, носителей заряда неравенство (3) в приконтактной области выполняется, то есть рекомбинацией на поверхности можно пренебречь. Напряжение в области контакта достаточно высокое, поэтому диффузию носителей заряда также можно не учитывать. Таким образом, распределение носителей заряда в образце к моменту окончания инжектирующего импульса тока можно определить из следующего выражения [3]:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\mu_p I}{2\pi\sigma_0 r^2} \frac{\partial \Delta p}{\partial r} - \frac{\Delta p}{\tau_p}. \quad (4)$$

Решив уравнение (4), получим, что к моменту окончания инжектирующего импульса тока t_n концентрация избыточных носителей заряда достигает значения [3, 4]:

$$\Delta p(r_1) = \Delta p(r_0) \exp\left[-\frac{2\pi\sigma_0}{3\mu_p I} (r_1^3 - r_0^3)\right]. \quad (5)$$

Зависимость между глубиной проникновения инжектированных носителей заряда и длительностью импульса можно найти из дифференциального уравнения [3]:

$$\frac{dr}{dt} = \mu_p \xi = \frac{\mu_p I}{2\pi\sigma_0 r^2}.$$

Выполнив интегрирование, получим [3]:

$$t_n = \frac{2\pi\sigma_0}{3\mu_p I} (r_1^3 - r_0^3).$$

Функция (5) описывает распределение носителей заряда в образце в интервале значений r [3]:

$$r_0 \leq r \leq \left[\frac{3\mu_p I}{2\pi\sigma_0} t_n + r_0^3 \right]^{\frac{1}{3}}.$$

Распределение носителей заряда через время t по завершении инжектирующего импульса можно найти с помощью решения уравнения (6) с учетом рекомбинации в объеме образца.

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial r^2}. \quad (6)$$

Рассматривая предельный случай безгранично большой скорости рекомбинации носителей заряда, получаем предельное условие [3]:

$$\Delta p(r, t)|_{r=r_0} = 0. \quad (7)$$

С помощью подстановки $\Delta p(r, t) = \Delta p_0(r, t) \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$, уравнение (6) сводится к диффузионному уравнению [3]:

$$\frac{\partial \Delta p_0(r, t)}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 \Delta p_0(r, t)}{\partial r^2}. \quad (8)$$

Решением выражения (8) служит функция [2]:

$$\Delta p_0(r, t) = \frac{1}{2r\sqrt{\pi D_p t}} \int_0^\infty (\xi + r_0) \Delta p(\xi + r_0) \times \left\{ \exp\left[-\left[\frac{(r-\xi)^2}{4D_p t}\right]\right] \exp\left[-\frac{(r+\xi)^2}{4D_p t}\right] \right\} d\xi.$$

Следовательно,

$$\Delta p(r, t) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{\tau_p}\right)}{2r\sqrt{\pi D_p t}} \int_0^\infty (\xi + r_0) \Delta p_0(\xi + r_0) \times \left\{ \exp\left[-\left[\frac{(r-\xi)^2}{4D_p t}\right]\right] \exp\left[-\frac{(r+\xi)^2}{4D_p t}\right] \right\} d\xi. \quad (9)$$

Для того, чтобы рассчитать напряжение $\Delta U(t)$, нужно в (6) подставить (9), после чего получим [3]:

$$\begin{aligned} \Delta U(t) = U(\infty) - U(t) = \text{const} \frac{\exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)}{\sqrt{D_p t}} \int_0^\infty \frac{1}{r^3} \exp\left[-\frac{(r-r_0)^2}{4D_p t}\right] \times \\ \times \int_0^\infty (r' - r_0) \exp\left[-\frac{r'^2}{4D_p t}\right] \text{sh}\left(\frac{r-r_0}{2D_p t} r'\right) \Delta p_0(r' + r_0) dr' dr. \end{aligned} \quad (10)$$

Анализ выражения (10) показывает, что выражение значительно упрощается при выполнении условия $r_0 \ll \sqrt{D_p t}$ [2], а также в случае, когда глубина проникновения инжектированных носителей заряда мала.

$$\left(\frac{3\mu_p I}{2\pi\sigma_0} t_n + r_0^3\right)^{\frac{1}{3}} \ll 2\sqrt{D_p t}, \quad (11)$$

$$\Delta U(t) = \text{const} \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right). \quad (12)$$

При большой глубине проникновения носителей заряда напряжение [3]:

$$\Delta U(t) = \text{const} \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right). \quad (13)$$

Закон изменения $\Delta U(t)$ соответствует выражению (13) при соблюдении следующего условия [3]:

$$\frac{2\pi\sigma_0}{3\mu_p\tau_p I} (4D_p t)^{\frac{3}{2}} \ll \frac{\sqrt{\pi}}{2}. \quad (14)$$

При достаточно большом токе и времени задержки, которое находится в пределах от τ_p до $3\tau_p$, данное условие несложно реализовать.

Схема генератора на основе транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением по переменному току в общем виде представлена на рис. 2. На схеме суммарная индуктивность $L=L_0+L_1$ и сопротивление $R=r_0+R_1$, где L_0, r_0 – индуктивность и сопротивление внешнего круга, L_1, R_1 – индуктивность и сопротивление выводов транзисторной структуры. Развитие процессов в этой схеме связано с изменением тока i_T и напряжения U [6]:

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{U_{\text{пит}} - i_T R - U}{L}, \quad (15)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{i_T - I(U)}{C(U)}. \quad (16)$$

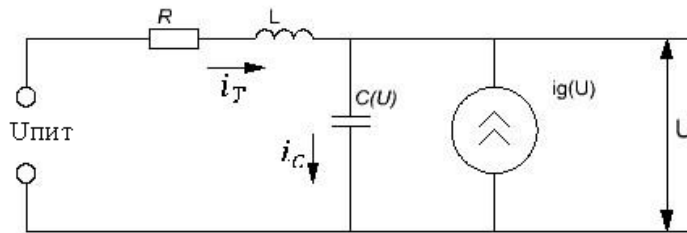


Рис. 2. Схема генератора по переменному току

Уравнения (15) и (16) можно объединить путем деления первого на второе, то есть [6]:

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{U_{\text{пит}} - i_T R - U}{i_T - I(U)} \cdot \frac{C(U)}{L}. \quad (17)$$

В состоянии равновесия (U_0, i_{T0}) токи и напряжения схемы не изменяются, поэтому [6]:

$$\left. \frac{di_T}{dt} \right|_{i_T=i_{T0}} = 0, \quad \left. \frac{dU}{dt} \right|_{U=U_0} = 0. \quad (18)$$

Используя условие (18), из уравнений (15) и (16) находим [6]:

$$U_{\text{жив}} - i_{T0} R - U_0 = 0, \quad (19)$$

$$i_{T0} - I(U_0) = 0. \quad (20)$$

Дифференциальное уравнение колебательной схемы примет вид [6]:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{du}{dt} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) + \frac{u}{LC} \left(\frac{R}{R_g} + 1 \right) = 0. \quad (21)$$

Тогда характеристическое уравнение можно записать в виде [6]:

$$x^2 + x\left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C}\right) + \frac{u}{LC}\left(\frac{R}{R_g} + 1\right) = 0. \quad (22)$$

Корни характеристического уравнения определяют из (22) [6]:

$$x_{1,2} = \frac{-\left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C}\right)^2 - 4 \frac{1}{LC} \left(\frac{R}{R_g} + 1\right)}}{2}. \quad (23)$$

Решение уравнения (21) можно записать в виде [6]:

$$u(t) = A \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{R}{R_g} \right)} \right] t + \\ + B \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{R}{R_g} \right)} \right] t + \frac{U_{\text{жив}}}{\left(1 + \frac{R}{R_g} \right)}. \quad (24)$$

На основе определения полного сопротивления определяют частоту генерации [6]:

$$Z = R + \frac{R_g}{(\omega C R_g)^2 + 1} + j \left(\omega L - \frac{\omega C R_g^2}{1 + (\omega C R_g)^2} \right). \quad (25)$$

При выполнении условия [6]:

$$\omega L - \frac{\omega C R_g^2}{1 + (\omega C R_g)^2} = 0, \quad (26)$$

в схеме наступает резонанс. Из уравнения (21) определяем частоту [6]:

$$F = \frac{1}{2\pi |R_g(\tau)| C_{\text{экв}}(\tau)} \sqrt{\frac{R_g^2(\tau) C_{\text{экв}}^2(\tau)}{L} - L}. \quad (27)$$

Относительную чувствительность можно определить с помощью уравнения [6]:

$$S_F^\tau = \frac{\tau}{F} \cdot \frac{dF}{d\tau}. \quad (28)$$

Результаты моделирования

Микроэлектронный сенсор с частотным выходом для определения времени жизни носителей заряда состоит из устройства для определения времени жизни носителей заряда методом модуляции проводимости в точечном контакте и микроэлектронного частотного преобразователя (рис. 3).

В начальный момент времени через точечный контакт на поверхности образца в прямом направлении не проходит прямоугольный импульс. Повышением напряжения источника постоянного напряжения E_{num} до величины, когда на электродах транзисторов $VT1$ и $VT2$ возникает отрицательное сопротивление, приводящее к возникновению электрических колебаний в контуре, образованном параллельным включением полного сопротивления с емкостной составляющей на электродах транзисторов $VT1$ и $VT2$ и индуктивности L . Конденсатор C предотвращает прохождение переменного тока через источник постоянного напряжения E_{num} . Прямоугольный импульс тока от генератора $G1$ поступает на образец. Через некоторое время, регулируемое с помощью линии задержки $ЛЗ$, на образец с

генератора $\Gamma 2$ подается следующий импульс тока. Генераторы $\Gamma 1$ и $\Gamma 2$ вместе с линией задержки $\Gamma 3$ образуют генератор спаренных импульсов (рис. 3). Напряжение на образце через ограничитель импульсов подается на микроселектронный частотный преобразователь и приводит к эффективному изменению частоты колебания микроселектронного частотного преобразователя.

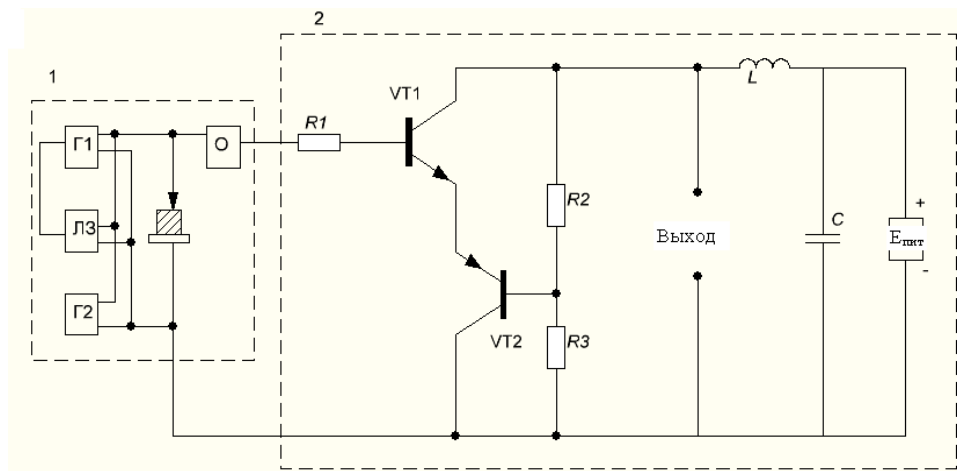


Рис. 3. Микроселектронный сенсор с частотным выходом для определения времени жизни носителей заряда методом модуляции проводимости в точечном контакте

Для корректности моделирования, проведенного с помощью среды OrCad 9.2, устройство для определения времени жизни носителей заряда методом модуляции проводимости в точечном контакте (рис. 3) заменено на источник питания $V2$, на который подавалось напряжение, определенное с помощью экспериментальных исследований [5].

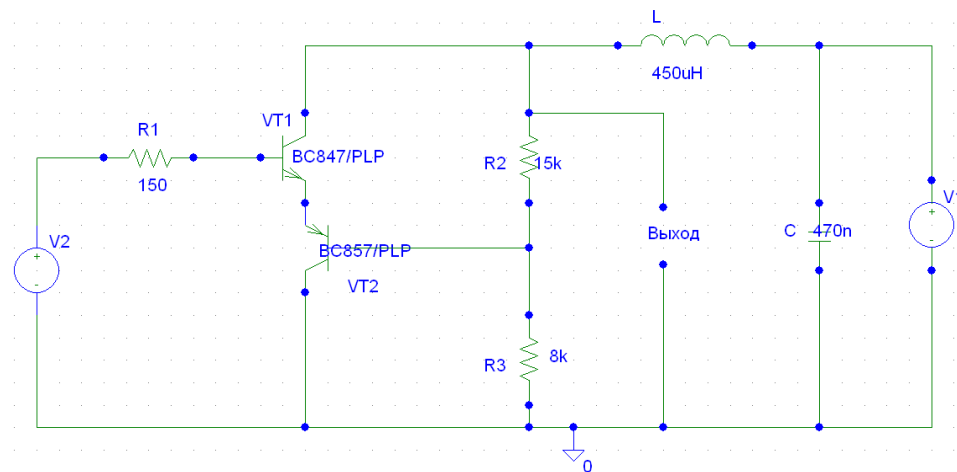


Рис. 4. Схема моделирования

Изменяя значение напряжения на источнике питания $V2$, снимают соответствующие значения частоты колебания микроселектронного частотного преобразователя, а по результатам моделирования строят график зависимости частоты исходного сигнала от времени жизни носителей заряда (рис. 5).

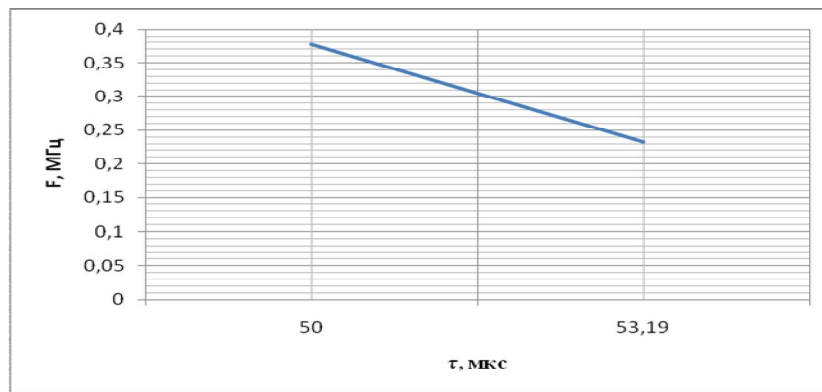


Рис. 5. График зависимости частоты от изменения времени жизни носителей заряда

Для расчета относительной чувствительности построены графики, исследование которых показало, что относительная чувствительность предложенного метода почти на порядок выше по сравнению с теоретическими исследованиями [5].

Выводы

На основе представленной математической модели разработан и промоделирован микроэлектронный сенсор с частотным выходом для определения времени жизни носителей заряда методом модуляции проводимости в точечном контакте. Относительная чувствительность предложенного метода, как показали расчеты, почти на порядок выше по сравнению с теоретическими исследованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блад П. Методы измерения электрических свойств полупроводников / П. Блад, Дж.В. Оргон. – Зарубежная радиоэлектроника, 1981. – 49 с.
2. Ковтонюк Н. Ф. Измерение параметров полупроводниковых материалов / Н. Ф. Ковтонюк, Ю. А. Концевой. – «Металлургия», 1970. – 432 с.
3. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов: Учеб. для вузов по спец. «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы» / Л. П. Павлов. – М.: Высш. школа, 1987. – 239 с.
4. Батвин В. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур / Батвин В. В., Концевой Ю. А. Федорович Ю. В. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
5. Уколов А. И. О применимости методик определения параметров рекомбинации носителей заряда к приповерхностным слоям полупроводника / А. И. Уколов, В. А. Надточий, А. З. Калимбет, Д. С. Москаль // Пошук і знахідки. Серія: фізико – математичні науки. – 2010. – № 1. – С. 88 – 94.
6. Осадчук В. С. Напівпровідникові перетворювачі інформації / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця ВНТУ, 2004. – 208 с.
7. Огляд методів визначення часу життя носіїв заряду в напівпровідниках [Електронний ресурс] / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Р. В. Дуда // Новості наукової думки – 2013: VIII Міжнародна науково технічна конференція, 27 жовтня – 5 листопада 2013 р. м. Прага, Чехія: тези доповідей – Режим доступу: http://www.rusnauka.com/31_NNM_2013/Tecnic/6_145682.doc.htm.

Осадчук Владимир Степанович – д. т. н., профессор кафедры электроники.
Винницкий национальный технический университет.

Осадчук Александр Владимирович – д. т. н., профессор кафедры радиотехники.
Винницкий национальный технический университет.

Дуда Роман Валериевич – аспирант кафедры электроники.
Винницкий национальный технический университет.