



ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕМБРАН ДЛЯ МЭМС ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

INVESTIGATING MECHANICAL STRENGTH OF MULTILAYER MEMBRANES FOR MEMS CONVERTERS OF PHYSICAL QUANTITIES

УДК 53.043

ГУСЕВ ЕВГЕНИЙ ЭДУАРДОВИЧ
bubbledouble@mail.ru

GUSEV EVGENIY E.
bubbledouble@mail.ru

ДЕДКОВА АННА АЛЕКСАНДРОВНА
my_name9999@mail.ru

DEDKOVA ANNA A.
my_name9999@mail.ru

ДЮЖЕВ НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ
djuzhev@unicm.ru

DJUZHEV NIKOLAY A.
djuzhev@unicm.ru

ЦКП «МСТ и ЭКБ» МИЭТ

R&D Center "MST and ECB" MIET

Представлена конструкция для определения механической прочности, механических напряжений и модуля упругости. Работа устройства проверена на круглых мембранах из оксида и нитрида кремния различного диаметра. Величина двухосного модуля получена аналитическим методом и рассчитана на основе экспериментальных данных. Наблюдается хорошая корреляция между полученными результатами. Показана упругая деформация при избыточном давлении не более 0,6 атм. Определено критическое давление для каждого диаметра. Показано, что круглые мембраны различного диаметра выдерживают одинаковое значение внешней силы.

Ключевые слова: механическая прочность; механические напряжения; механические свойства; двухосный модуль упругости.

The paper presents the design of a stand for determining mechanical strength, mechanical stresses and modulus of elasticity. The stand has been tested using circular membranes of silicon oxide and silicon nitride of various diameters. The magnitude of the biaxial module has been obtained analytically and calculated basing on experimental data. There is a good correlation between the results obtained. An elastic deformation has been shown at an excess pressure of not more than 0.6atm. The critical pressure for each diameter has been determined. It has been shown that circular membranes of different diameters withstand the same value of the external force.

Keywords: mechanical strength; mechanical stresses; mechanical properties; biaxial Young's modulus.

ВВЕДЕНИЕ

Ключевую роль в МЭМС устройстве играет мембрана, которая состоит из одного или нескольких слоев. Каждый слой обладает своими механическими свойствами. Производительность прибора сильно зависит от механических свойств используемых материалов. Точные значения механических свойств (свойства упругости, внутренние напряжения, прочность, усталость) необходимы для получения оптимальных характеристик. Упругие свойства необходимы для прогнозирования величины отклонения от приложенной силы, а прочность материала задает эксплуатационные пределы устройства [1]. Например, в процессе работы рентгеновского источника создается вакуум и поэтому мембрана-анод должна выдерживать перепад давлений [2]. Кроме того, с учетом требований надежности и срока службы механические характеристики МЭМС материалов становятся все более важными. На рис. 1 показан изгиб пленок под действием механических напряжений.

Небольшие размеры МЭМС-устройств часто приводят к их использованию в суровых условиях, и хорошее знание механических свойств может привести к устранению некоторых механических неисправностей посредством надлежащего выбора материала, проектирования, изготовления и корпусирования [1].

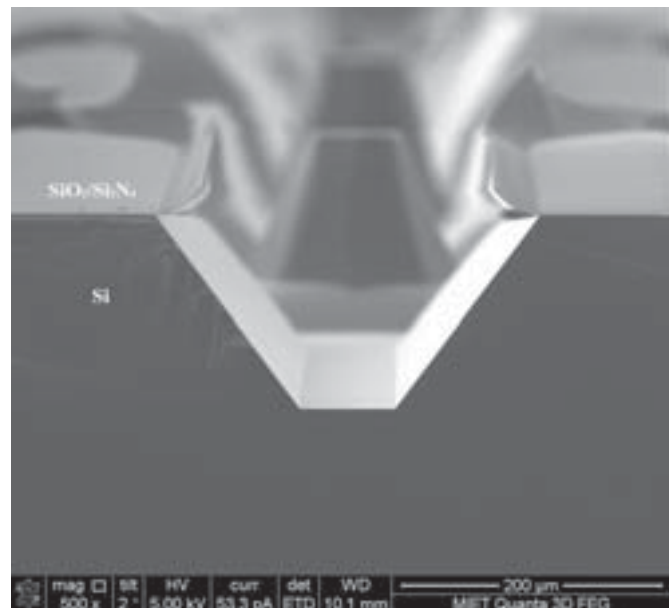


Рис. 1. Влияние механических напряжений

Fig. 1. The influence of mechanical stresses



КОНСТРУКЦИЯ СТЕНДА

Определение механических свойств материалов проводилось на разработанном стенде, схема которого показана на рис. 2.

Давление с компрессора подается на редуктор, который имеет ограничение по максимальному давлению — 5 атм. Для уменьшения перепадов давления между редуктором и кристаллом установлен ресивер. В цепи используется несколько манометров. Между ресивером и подставкой с кристаллом установлен первый манометр, который используется для определения значений избыточного давления, подаваемого на МЭМС мембрану, с шагом измерения 0,05 атм и пределом измерений до 2,5 атм. На втором манометре показывается давление с компрессора. В процессе разработки конструкции стенда было выяснено, что для получения точных данных фокусное расстояние между исследуемой поверхностью и объективом не должно превышать 5 мм. Подставка с кристаллом состоит из металлической крышки, кристалла, приклеенного на текстолит (рис. 2), и резиновой шайбы. В металлической крышке и текстолите сделано отверстие для работы с оптическим профилометром.

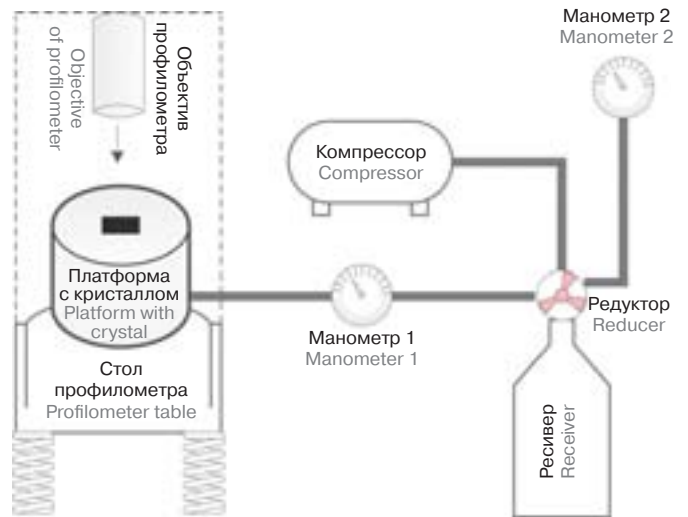


Рис. 2. Схема стенда для измерения механических свойств

Fig. 2. The layout of the stand for determining mechanical properties

INTRODUCTION

A key role in the micro electronic and mechanical systems (MEMS) is played by a membrane that consists of one or several layers. Each layer has its own mechanical properties. The performance of MEMS strongly depends on the mechanical properties of materials used. Accurate values of mechanical properties (elastic properties, internal stress, strength, fatigue) are necessary for obtaining the optimum performances. Elastic properties are necessary for predicting the amount of deflection from an applied force, and material strength sets the device operational limits [1]. For example, during the operation of the X-ray source, a vacuum is created and therefore the membrane must withstand the pressure drop [2]. Also, in view of reliability and life time requirements, mechanical characterization (including mechanical stresses) of MEMS materials becomes increasingly important. Fig. 1 shows the films bent under the action of mechanical stresses.

The small size of MEMS devices often leads to their usage in harsh environments, and good knowledge of mechanical properties may result in elimination of some of the mechanical failure modes through proper material selection, design, fabrication and packaging [1].

THE STAND CONSTRUCTION

The values of mechanical properties have been determined on the developed stand (see Fig. 2).

The pressure from the compressor is fed to the reducer, which has a maximum pressure limit of 5atm. A receiver has been installed to reduce pressure drop between reducer and

crystal. Several manometers are used in the circuit. One manometer is installed between receiver and platform with a crystal for measuring excess pressure on MEMS membrane (the step being 0.05atm and the measurement limit up to 2.5atm). The second manometer shows the pressure from compressor. It appeared that to obtain accurate data, the focal length between the surface and the objective should not exceed 5mm. The platform with a crystal consists of a metal cover, a crystal glued to the textolite (Fig. 2), and a rubber washer. A hole is made in the metal cover and textolite for working with an optical profilometer.

THE EXPERIMENT

We have used a silicon plate with 150mm diameter and 460um thickness. A membrane has been formed on a Si crystal of square shape with a side of 6mm. The membrane consists of four dielectric layers of silicon oxide and nitride with a total thickness of 1.26um. The topology of a set of membranes is a circle with diameters of 1.0mm, 1.4mm and 1.8mm located in the center of the crystal.

Fig. 3 shows the elastic deformation of a membrane with 1.4mm diameter.

Fig. 4 shows the measurement results for a 1.0mm diameter structure.

The graph shows that the membrane has elastic (reversible) deformations, the critical excess pressure P^* being 1.6atm for 1.0mm diameter.

The bulge method of dependence of deflection w on external force (pressure) makes it possible to determine the mechanical

properties (biaxial module $E/(1 - \mu)$ and critical excess pressure) of the membrane using the formula 1 [1, 3]:

$$P = \frac{4 \cdot \sigma_0 \cdot t \cdot w}{a^2} + \frac{8 \cdot E \cdot t \cdot w^3}{3 \cdot (1 - \mu) \cdot a^4}, \quad (1)$$

where P is the excess pressure, w is the deflection of the center of the membrane; σ_0 , a , t , E and μ are residual stress, radius, thickness, Young's modulus and Poisson's ratio of the circular membrane.

The bulge method is based on the following principle: membrane surface is flat without excess pressure. Applying an external action (in our case, an excessive air pressure by means of a compressor) perpendicular to the plane of the surface of test crystal, it is possible to measure the dependence of deflection of membrane on external force.

The value of residual stresses σ_0 has been determined by the method developed earlier by the authors [4] by means of a profilometer, and it amounted to 200MPa. The magnitude of the biaxial module $E/(1 - \mu)$ has been calculated using the formula (1): for $\varnothing 1.0$ mm it is 132GPa; for $\varnothing 1.4$ mm it is 156GPa; for $\varnothing 1.8$ mm it is 143GPa. The value correlates with the experimental result for a membrane consisting of one pair $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ — 190GPa [5]. Also, the value of critical excess pressure has been determined: for $\varnothing 1.0$ mm — 1.6atm; for $\varnothing 1.4$ mm — 0.8atm; for $\varnothing 1.8$ mm — 0.5atm. The results confirm that the size effect and technological parameters of the process affect the elasticity characteristics of materials [1].

It is known from [6] that Young's modulus of oxide silicon $E(\text{SiO}_2)$ is 70GPa, Poisson's

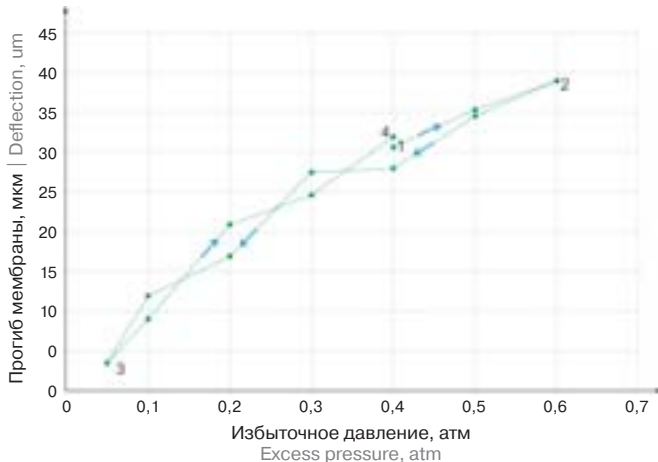


Рис. 3. Зависимость величины отклонения мембраны диаметром 1,4 мм от избыточного давления

Fig. 3. Dependence of deflection of 1.4mm diameter membrane on excess pressure

ЭКСПЕРИМЕНТ

Использовалась пластина кремния диаметром 150 мм толщиной 460 мкм. Была сформирована мембрана на Si кристалле квадратной формы со стороной 6 мм. Исследуемая структура состоит из набора четырех чередующихся диэлектрических слоев из оксида и нитрида кремния суммарной толщиной 1,26 мкм. Топология набора мембран представляет собой круг диаметром 1,0 мм, 1,4 мм и 1,8 мм, расположенный по центру кристалла. Рис. 3 показывает упругую деформацию мембраны диаметром 1,4 мм.

Рис. 4 показывает результаты измерений мембраны диаметром 1,0 мм.

Заметно, что для мембраны диаметром 1,0 мм критическое избыточное давление составляет 1,6 атм.

Метод зависимости прогиба w (отклонения, деформации) от нагрузки позволяет определить механические свойства мембраны (модуль Юнга E и коэффициент Пуассона μ), состоящей из одной или нескольких пленок по формуле 1 [1, 3]:

$$P = \frac{4 \cdot \sigma_0 \cdot t \cdot w}{a^2} + \frac{8 \cdot E \cdot t \cdot w^3}{3 \cdot (1 - \mu) \cdot a^4}, \quad (1)$$

где P — приложенное давление, w — прогиб (отклонение) центра мембраны; σ_0 , a , t , E и μ — остаточное напряжение, радиус, толщина, модуль Юнга и коэффициент Пуассона круглой мембраны.

Основан метод на принципе, что поверхность мембраны плоская без нагрузки. В мембране присутствуют остаточные напряжения σ_0 , которые были определены по разработанной ранее авторами методике [4] посредством профилометра и составили 200 (МПа). Прикладывая внешнее воздействие (в нашем случае избыточное давление воздуха посредством компрессора) перпендикулярно плоскости поверхности исследуемого образца, можно измерить зависимость от нагрузки.

Из формулы (1) определяем значение двухосного модуля мембраны $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ $E/(1 - \mu)$: \varnothing 1,0 (мм) 132 (ГПа); \varnothing 1,4 (мм) 156 (ГПа); \varnothing 1,8 (мм) 143 (ГПа). Значение коррелирует с экспериментальным результатом для мембраны, состоящей из одной пары $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ (190 ГПа) [5]. Также определено критическое избыточное давление: \varnothing 1,0 (мм) 1,6 (атм); \varnothing 1,4 (мм) 0,8 (атм); \varnothing 1,8 (мм) 0,5 (атм). Результаты подтверждают, что размерный

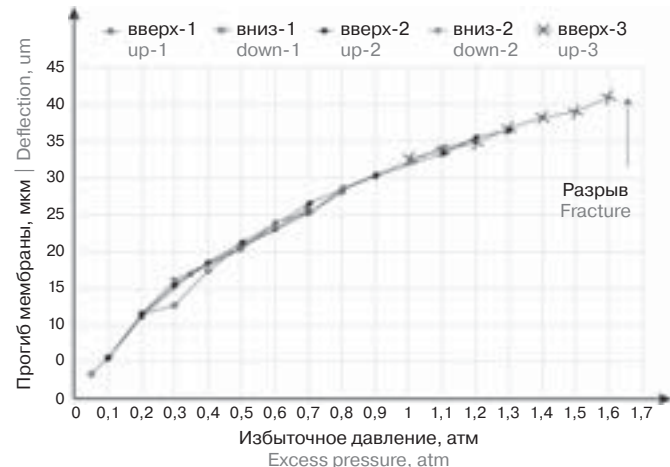


Рис. 4. Зависимость прогиба мембраны диаметром 1,0мм от избыточного давления

Fig. 4. Dependence of deflection of 1.0mm diameter membrane on excess pressure

эффект и технологические параметры процесса влияют на упругие характеристики материала [1].

Известно [6], что модуль Юнга для оксида кремния $E(\text{SiO}_2)$ составляет 70 ГПа и для нитрида кремния $E(\text{Si}_3\text{N}_4)$ 270 ГПа, коэффициент Пуассона для оксида кремния $\mu(\text{SiO}_2)$ 0,2, для нитрида кремния 0,27.

Далее по формуле (2) рассчитываем модуль Юнга мембраны E_m из модели, представленной в работе [7]:

$$E_m = \frac{E_{\text{SiO}_2} \cdot H_{\text{SiO}_2} + E_{\text{Si}_3\text{N}_4} \cdot H_{\text{Si}_3\text{N}_4}}{H_{\text{SiO}_2} + H_{\text{Si}_3\text{N}_4}}, \quad (2)$$

где H_{SiO_2} — толщина SiO_2 , $H_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ — толщина Si_3N_4 .

Аналогично, для коэффициента Пуассона. В нашем случае, суммарная толщина SiO_2 1,0 мкм, суммарная толщина Si_3N_4 0,26 мкм, модуль Юнга мембраны E_m 111 (ГПа), коэффициент Пуассона мембраны 0,21. Следовательно, аналитическое значение двухосного модуля составляет 142 (ГПа). Экспериментальное и аналитическое значения хорошо коррелируют.

Как известно, величина силы равна произведению давления на площадь (формула 3):

$$F = P \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (3)$$

где d — диаметр мембраны, P — предельное избыточное давление

В результате эксперимента установлено, что круглые мембраны различного диаметра выдерживают одинаковое значение внешней силы. Величина силы составляет 125 мН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная конструкция стенда позволяет контролировать изменение отклонения мембраны от избыточного давления с шагом 0,05 атм. Двухосный модуль упругости $E/(1 - \mu)$ мембраны $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ составляет 144 ± 12 ГПа. Установлено, что с уменьшением площади мембраны с $2,54 \text{ мм}^2$ до $0,785 \text{ мм}^2$ возрастает предельное избыточное давление от 0,5 до 1,6 атм исследуемой структуры. Показана обратимая деформация отклонения мембраны от избыточного давления. Предельная сила внешнего воздействия на мембрану не зависит от площади поверхности и составляет 125 мН.



Работа выполнена на оборудовании ЦКП «МСТ и ЭКБ» МИЭТ при поддержке Минобрнауки РФ (соглашение №14.594.21.0012, RFMEFI59417X0012).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kenichi Takahata, *Micro Electronic and Mechanical Systems*, ISBN 978-953-307-027-8, 386 pages, Publisher by InTech, 2009, Chapter 11 Mechanical Properties of MEMS Materials.
2. Djuzhev N. A., Makhiboroda M. A., Preobrazhensky R. Y. et al. Журнал исследования поверхности, 2017, 11: 443. DOI:10.1134/S1027451017020239.
3. Benoit Merle, *Mechanical Properties of Thin Films Studied by Bulge Testing*, Thesis, Ph.D., 2013.
4. Djuzhev N. A., Dedkova A. A., Gusev E. E., Makhiboroda M. A., Glagolev P. Y. *Non-Contact Technique for Determining the Mechanical Stress in Thin Films on Wafers by Profiler*. Source of the Document IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, DOI: 10.1088/1757-899X/189/1/012019.
5. Martins P. *On the Determination of Poisson's Ratio of Stressed Monolayer and Bilayer Submicron Thick Films*, Microsystem Technologies September 2009, Volume 15, Issue 9, pp. 1343–1348, DOI: 10.1007/s00542-009-0822-5.
6. Laconte J., Flandre D., Raskin J.-P. *Micromachined Thin-Film Sensors for SOI-CMOS Co-Integration*, Springer, 294 p., 2006.
7. Асташенкова О. Н. Физико-технологические основы управления механическими напряжениями в тонкопленочных композициях микромеханики, кан. диссертация, 2015.

ratio of oxide silicon $\mu(\text{SiO}_2)$ is 0.2, Young's modulus of nitride silicon $E(\text{Si}_3\text{N}_4)$ is 270 GPa, Poisson's ratio of nitride silicon $\mu(\text{Si}_3\text{N}_4)$ is 0.27.

Then using formula (2) we calculated the value of the Young's modulus of the membrane E_m from the mathematical model presented in [7]:

$$E_m = \frac{E_{\text{SiO}_2} \cdot H_{\text{SiO}_2} + E_{\text{Si}_3\text{N}_4} \cdot H_{\text{Si}_3\text{N}_4}}{H_{\text{SiO}_2} + H_{\text{Si}_3\text{N}_4}}, \quad (2)$$

where H_{SiO_2} is thickness of SiO_2 , $H_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ is thickness of Si_3N_4 .

Similarly, the Poisson's ratio was calculated. In our case, H_{SiO_2} is 1.0 μm , $H_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ is 0.26 μm , E_m is 111 GPa, μ_m is 0.21. Therefore, analytical value of biaxial module $E_m/(1 - \mu_m)$ of $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ membrane is 142 GPa. The experimental and analytical value strongly correlate.

As is known, the magnitude of the force F is equal to the product of the pressure by the area (formula 3):

$$F = P \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (3)$$

The experiment has shown that circular membranes of different diameters can withstand the same value of external force. The value of external force is 125 mN.

CONCLUSION

We have presented the design of the stand using bulge method. The stand makes it possible to control changes in the deflection of the membrane from excess pressure with 0.05 atm step. The experimental value of biaxial module $E/(1 - \mu)$ of $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ membrane is 144 ± 12 GPa. It has been established that as the area of the membrane decreases from 2.54 mm² to 0.785 mm², the critical excess pressure P^* increases from 0.5 to 1.6 atm. The reversible deflection of the membrane from the excess pressure has been shown. The limiting force of the external action on the membrane is independent of the surface area and makes 125 mN.

The work was performed using the equipment of MIET R&D Center "Microsystem Technique and the Bases of Electronic Components" supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state contract No. 14.594.21.0012, unique identifier of the project RFMEFI59417X0012).

REFERENCES

1. Kenichi Takahata, *Micro Electronic and Mechanical Systems*, ISBN 978-953-307-027-8, 386 pages, Publisher by InTech, 2009, Chapter 11 Mechanical Properties of MEMS Materials
2. Djuzhev N. A., Makhiboroda M. A., Preobrazhensky R. Y., Demin G. D., Gusev E. E., Dedkova A. A., J. Synch. Investig., 2017, 11: 443. DOI:10.1134/S1027451017020239
3. Benoit Merle, *Mechanical Properties of Thin Films Studied by Bulge Testing*, Thesis, Ph.D., 2013
4. Djuzhev N. A., Dedkova A. A., Gusev E. E., Makhiboroda M. A., Glagolev P. Y. *Non-Contact Technique for Determining the Mechanical Stress in Thin Films on Wafers by Profiler*. Source of the Document IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, DOI: 10.1088/1757-899X/189/1/012019
5. Martins P. *On the Determination of Poisson's Ratio of Stressed Monolayer and Bilayer Submicron Thick Films*, Microsystem Technologies September 2009, Volume 15, Issue 9, pp 1343–1348, DOI: 10.1007/s00542-009-0822-5
6. Laconte J., Flandre D., Raskin J.-P. *Micromachined Thin-Film Sensors for SOI-CMOS Co-Integration*, Springer, 294 p., 2006.
7. Astashenkova O. N., *Physico-technological Basis of Management Mechanical Stresses in Thin Film Compositions of Micromechanics*, Thesis, Ph. D., 2015. (In Russian).



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

ЭЛЕКТРОНИКА НАУКА ТЕХНОЛОГИЯ

НАНОИНДУСТРИЯ НАУКА ТЕХНОЛОГИЯ

ФОТОНИКА НАУКА ТЕХНОЛОГИЯ

ПЕРВАЯ МИЛЯ НАУКА ТЕХНОЛОГИЯ

Аналитика НАУКА ТЕХНОЛОГИЯ

СТАНКОИНСТРУМЕНТ НАУКА | ПРОЕКТИРОВАНИЕ | ПРОИЗВОДСТВО